

école \_\_\_\_\_  
normale \_\_\_\_\_  
supérieure \_\_\_\_\_  
paris – saclay \_\_\_\_\_



# Stage Liesse

## Electronique expérimentale

**Fabien Adam**

**[fabien.adam@ens-paris-saclay.fr](mailto:fabien.adam@ens-paris-saclay.fr)**

**29 & 30 avril 2024**

# Programme

## □ **Lundi 29 avril**

- 9h – 9h30 : Accueil au département Nikola Tesla de l'ENS Paris Saclay
- 9h30 – 12h30 : Présentation des manipulations
- 12h30 – 14h : Déjeuner
- 14h – 18h : Manipulations

## □ **Mardi 30 avril**

- 9h – 12h : Manipulations
- 12h – 13h30 : Déjeuner
- 13h30 – 17h30 : Manipulations et débriefing

## □ **Objectifs :**

- Renforcement des compétences expérimentales
- Acquisition d'une culture technologique et scientifique au travers d'exemples applicatifs actuels

## □ **Format :**

- Manipulations (plus ou moins proches du TP) et expériences de cours associées aux programmes de PTSI/PCSI/PT/PSI

# Programme

---

## □ Pré-requis

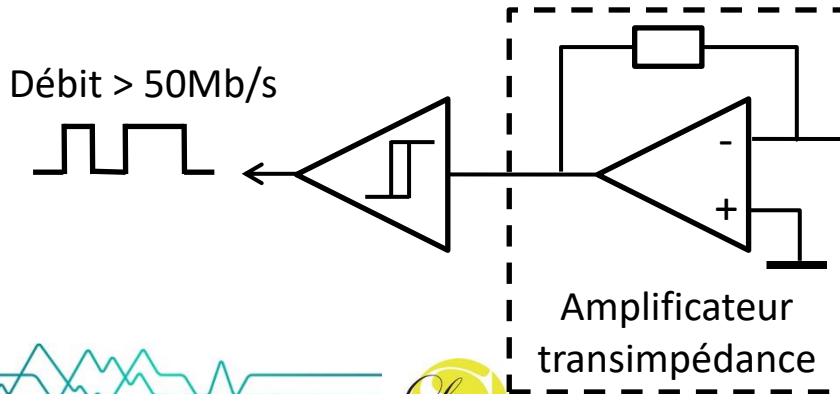
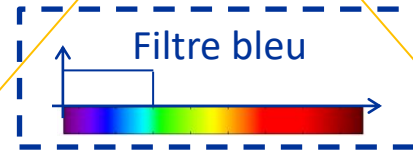
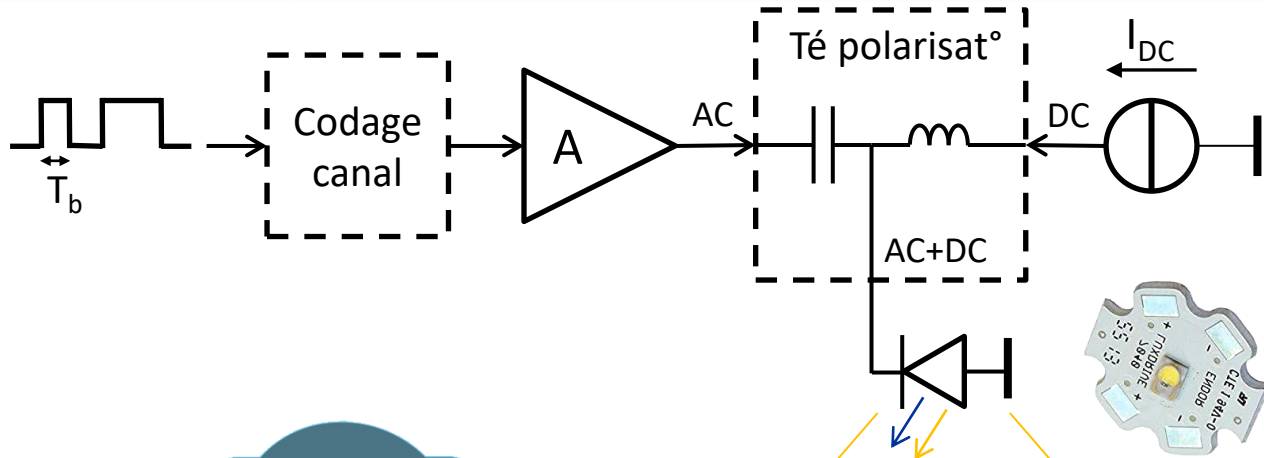
- Électronique des programmes de PTSI/PCSI/PT/PSI
- Mathématiques : analyse de Fourier

## □ Avant de commencer, faisons les présentations !

- Formation, filière(s), discipline enseignée
- Type d'activité où se retrouve l'électronique (Cours, TP, TIPE, ...)
- Motivations pour participer à ce stage
- ...

## □ Structure du stage : une manipulation « fil rouge »

# Communication (numérique) par la lumière



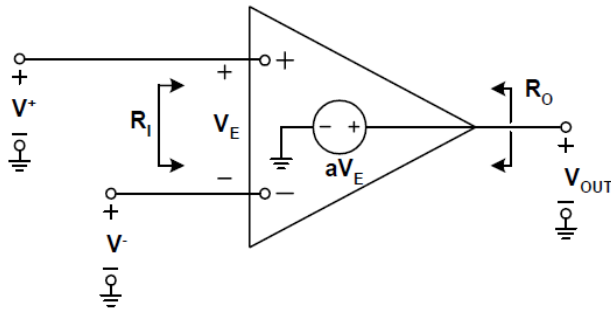
# Thèmes

---

1. L'amplificateur linéaire intégré (ALI, ou AOP)
2. Modulation et démodulation d'amplitude, détection synchrone
3. Les oscillateurs
4. Filtrage analogique d'un signal
5. Filtrage numérique d'un signal
6. Analyse spectrale avec un oscilloscope numérique

# 1. L'amplificateur linéaire intégré (ALI, ou AOP)

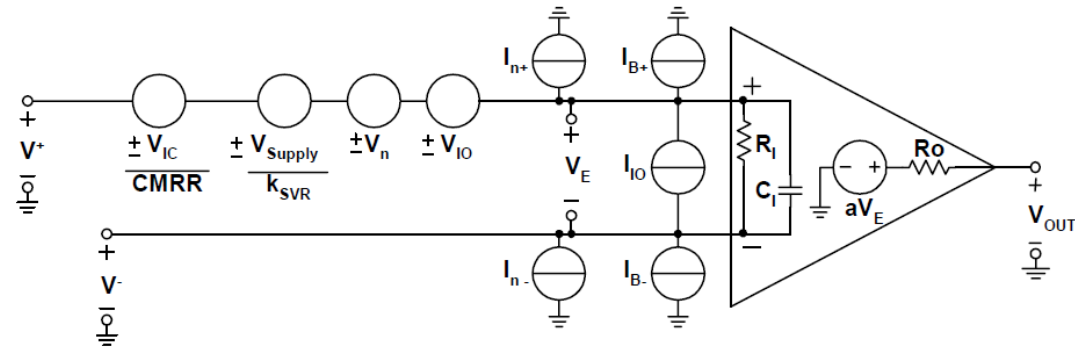
Modèle de l'ALI idéal



Imperfections



ALI réel



Paramètre

Valeur

Gain (a)

$\infty$

Résistance d'entrée ( $R_i$ )

$\infty$

Résistance de sortie ( $R_o$ )

0

Courant d'entrée ( $I^+ I^-$ )

0

Taux de réjection de mode commun (CMRR)

$\infty$

Réjection de l'alimentation ( $k_{SVR}$ )

$\infty$

## Questions:

- A quoi sont dues ces imperfections ?
- Quelles sont les performances d'un AOP moderne ?
- Pourquoi existe-t-il autant de références d'AOP ?



Tous ▾

Réf. Farnell / Réf. Fab. / Mots-clés

Q

Accueil > Semiconducteurs - Circuits intégrés > Amplificateurs et Comparateurs > Amplificateurs opérationnels (AOP)

Amplificateurs opérationnels (AOP): 8 595 produit(s) trouvé(s)

# 1. L'amplificateur linéaire intégré (ALI, ou AOP)

Structure interne de l'ALI

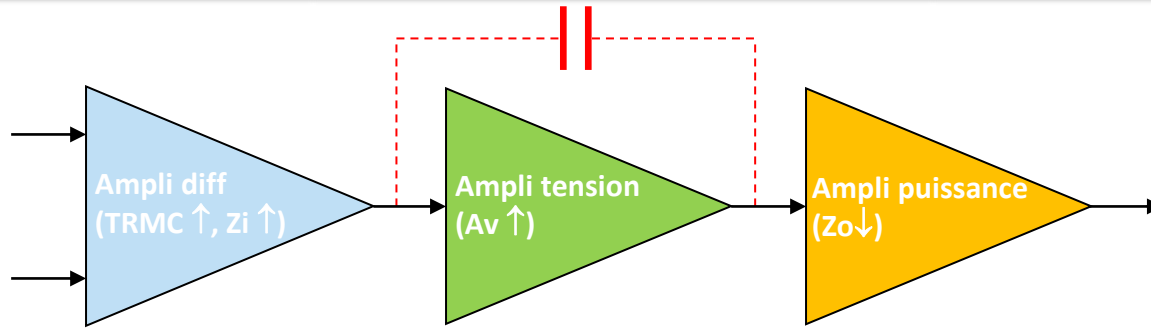


Diagramme de Bode

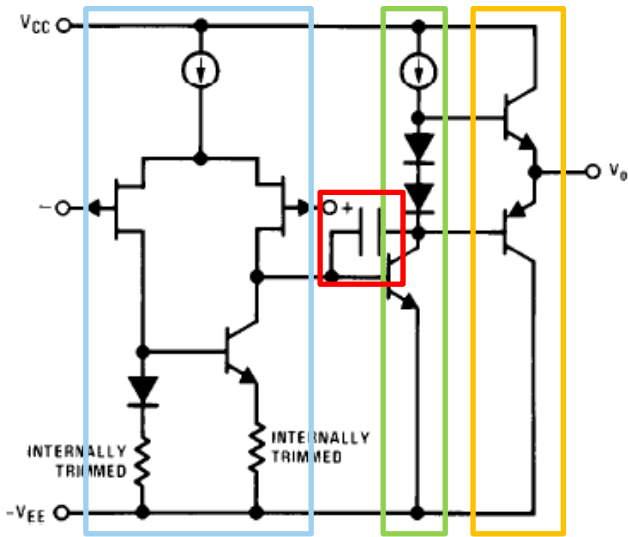
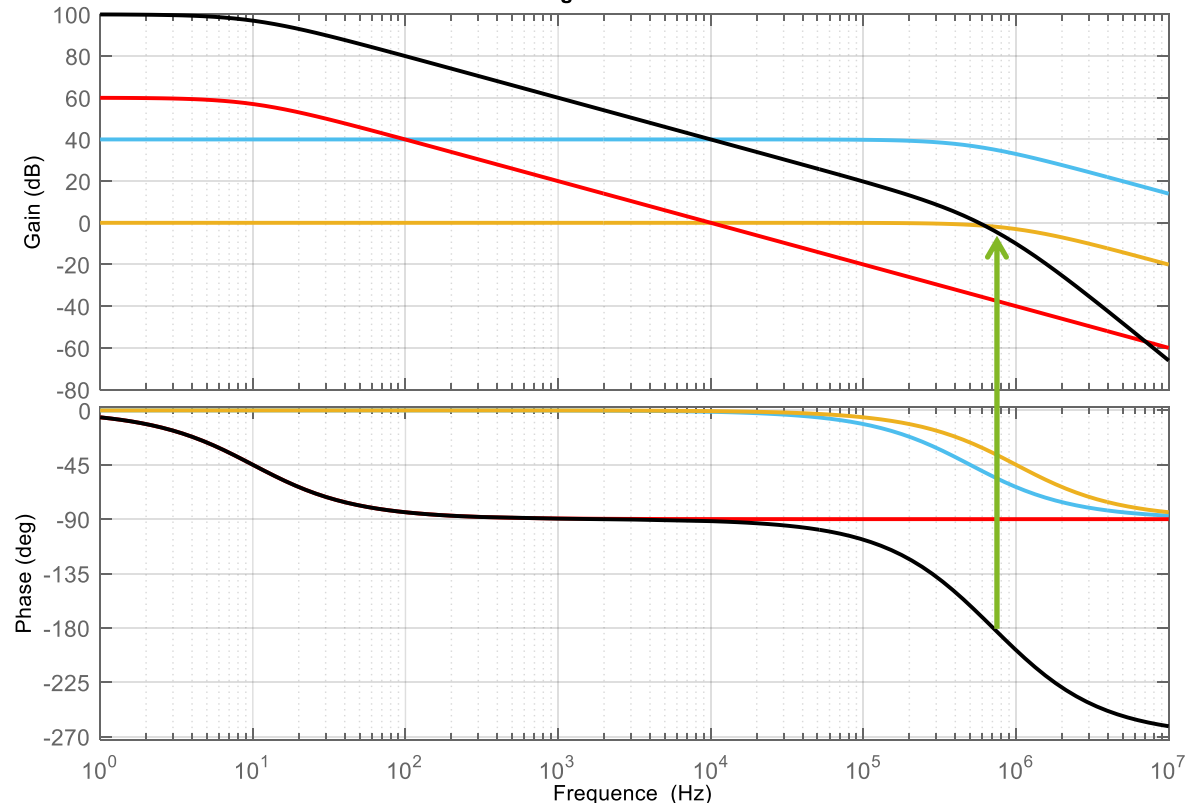
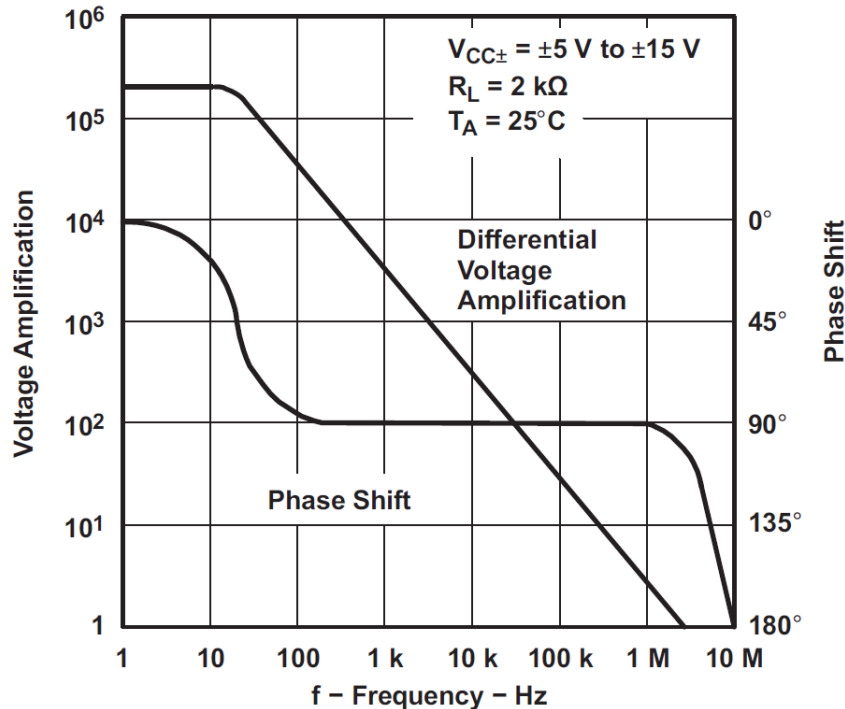


Schéma interne (simplifié) du TL081

# 1. L'amplificateur linéaire intégré (ALI, ou AOP)

## Réponse en fréquence de l'ALI



Réponse fréquentielle du TL081

Modèle de l'ALI (compensé par pôle dominant) :

$$\underline{A}(j\omega) = \frac{A_0}{1 + j \frac{\omega}{\omega_0}}$$

Avec pour le TL081 :  $A_0 \sim 10^5$  et  $f_0 \sim 10\text{Hz}$   
 Un ALI n'est pas un (bon) comparateur !

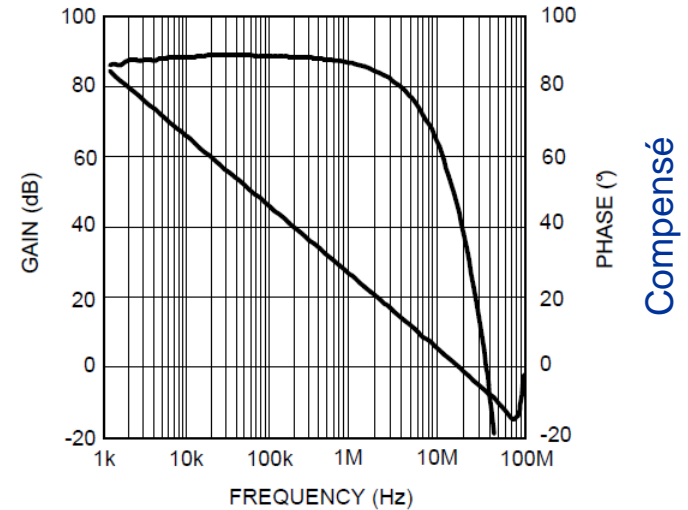


Figure 47. LMP7715  $A_{VOL}$  vs. Frequency

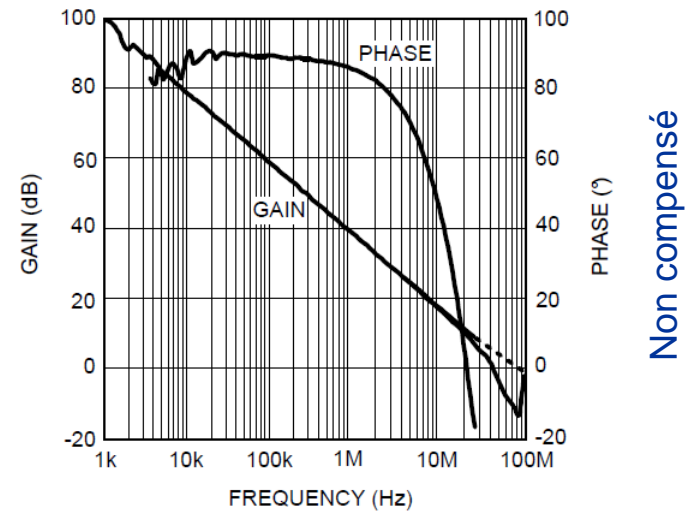


Figure 46. LMP7717  $A_{VOL}$  vs. Frequency



# 1. L'amplificateur linéaire intégré (ALI, ou AOP)

Performances des ALI modernes (2024)

	TL081	Autre	Mais ...
Produit gain bande (GBW)	3MHz	10GHz ( <i>LTC6409</i> )	$I_{bias}=70\mu A$
Gain statique ( $A_{VD}$ )	200V/mV (106dB)	12000V/mV (141dB) ( <i>OP177</i> )	SR=0,3V/ $\mu s$
Slew Rate (SR)	13V/ $\mu s$	6600V/ $\mu s$ ( <i>THS4509</i> )	$A_{VD}=2,5V/mV$ (68dB)
Courants d'entrée ( $I_{bias}$ )	30pA	3fA ( <i>LMP7721</i> )	SR=9V/ $\mu s$
Résistance d'entrée ( $R_i$ )	$10^{12}\Omega$	$>100.10^{12}\Omega$ ( <i>ADA4530</i> )	GBW=2MHz
Tension d'offset ( $V_{io}$ )	3mV	0,3 $\mu V$ ( <i>ADA4528</i> )	$R_i=225k\Omega$
Taux de réjection de mode commun (CMRR)	80dB	150dB ( <i>ADA4077</i> )	SR=1,2V/ $\mu s$

+ Bruit, distorsions, alimentations, ...

→ familles d'AOP selon le type de transistors/étage



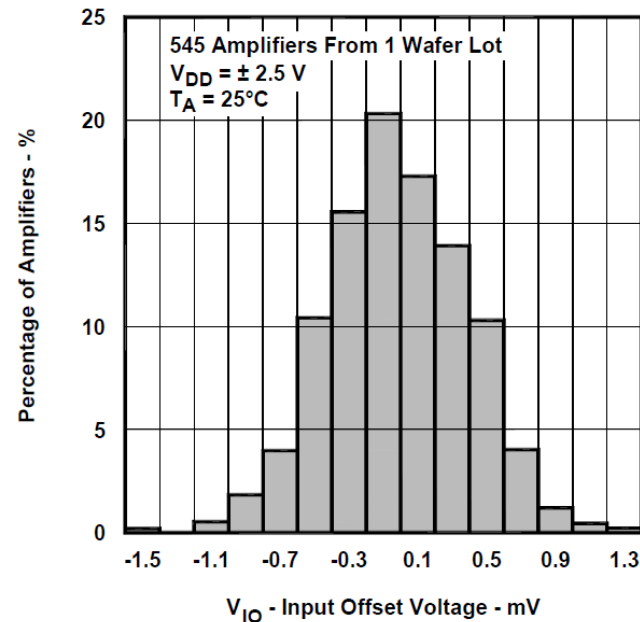
- L'ALI parfait n'existe pas !
- Les ALI modernes se rapprochent par certaines caractéristiques beaucoup de l'ALI idéal
- Le choix d'une référence résulte d'un compromis dicté par l'application

# 1. L'amplificateur linéaire intégré (ALI, ou AOP)

## Activité expérimentale

	TL081
Produit gain bande (GBW)	3MHz
Gain statique ( $A_{VD}$ )	200V/mV (106dB)
Slew Rate (SR)	13V/ $\mu$ s
Courants d'entrée ( $I_{bias}$ )	30pA
Résistance d'entrée ( $R_i$ )	$10^{12}\Omega$
Tension d'offset ( $V_{io}$ )	3mV
Taux de réjection de mode commun (CMRR)	80dB

- Mettre en évidence les imperfections d'un ALI
- Caractériser un ALI courant (TL081) et le comparer à d'autres ALI
- Sensibiliser à la dispersion des caractéristiques d'un composant
- Montrer qu'un modèle plus complet de l'ALI permet une meilleure compréhension de certains phénomènes



# 2. Modulation d'amplitude

## Pourquoi moduler ?

Objectif de la modulation :

- Adapter un signal informatif à un canal afin de permettre sa transmission

Signal informatif ↔ modulant

$m(t)$

Ex : signal audio [20Hz;20kHz]

Canal à bande passante limitée

$H(f)$

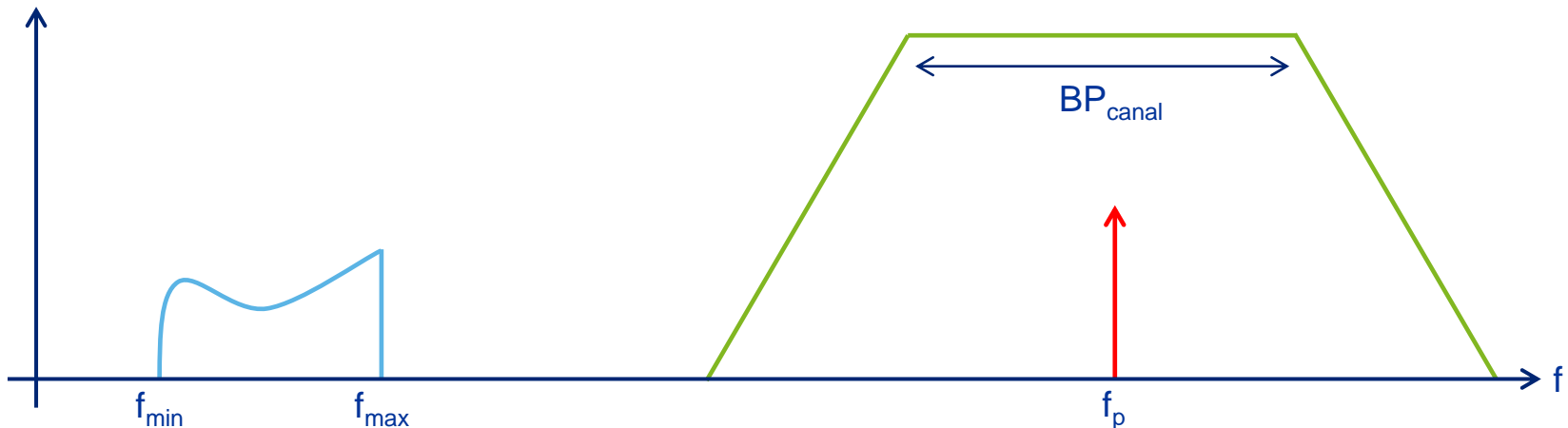
Ex : {DEL+air+photodiode}

Support de l'information ↔ porteuse

$p(t) = A \cos(2\pi f_p t + \varphi)$

Ex : lumière monochromatique rouge  
 $\lambda = 630\text{nm}$

$|M(f)|$   $|P(f)|$   $|H(f)|$



# 2. Modulation d'amplitude

## Pourquoi moduler ?

Objectifs de la modulation :

- Adapter un signal informatif à un canal afin de permettre sa transmission
- Permettre la transmission de plusieurs signaux informatifs dans un canal

Signaux informatifs ↔ modulateurs

$$m_i(t)$$

Ex : signaux audio [20Hz;20kHz]

Canal à bande passante limitée

$$H(f)$$

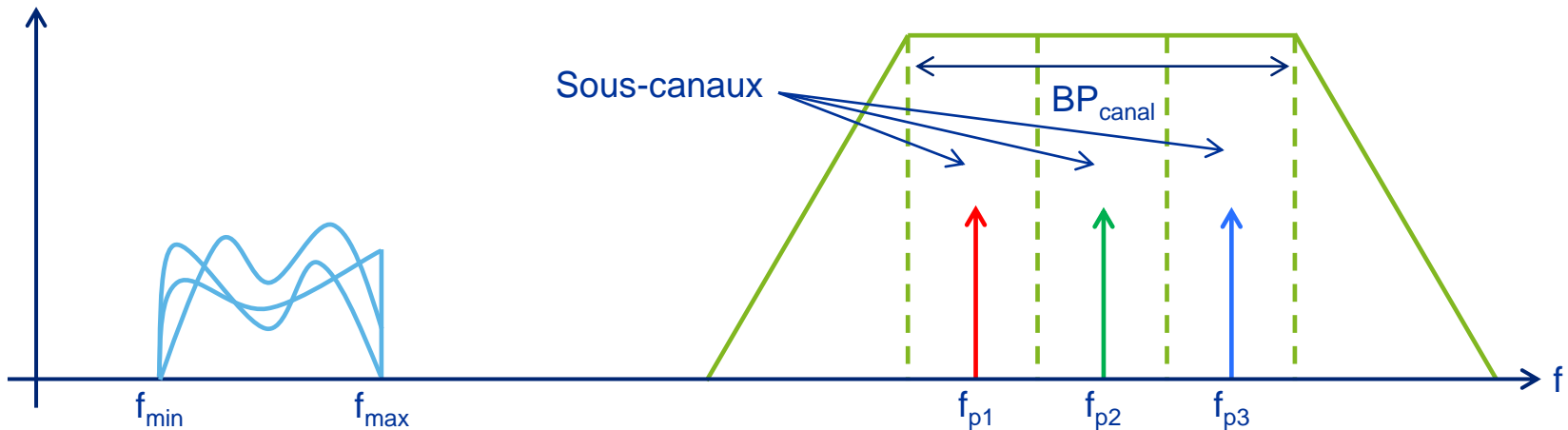
Ex : {DEL+air+photodiode}

Supports de l'information ↔ porteuses

$$p_i(t) = A \cos(2\pi f_{p_i} t + \phi)$$

Ex : lumières monochromatiques  
RVB

$|M_i(f)|$   $|P_i(f)|$   $|H(f)|$



# 2. Modulation d'amplitude

## Exemple d'application

Lien numérique par fibre optique jusqu'à l'utilisateur (FTTH : Fiber To The Home)

- Standard ITU (International Telecommunication Union) G.984
- Classe C : Bit « 0 » : 0dBm, bit « 1 » : +10dBm

Signaux informatifs ↔ modulateurs

$$m_i(t)$$

Voie montante : 1244Mbit/s

Voie descendante : 2488Mbit/s

Canal à bande passante limitée

$$H(f)$$

Fibre monomode

Diode Laser / PhD

Supports de l'information ↔ porteuses

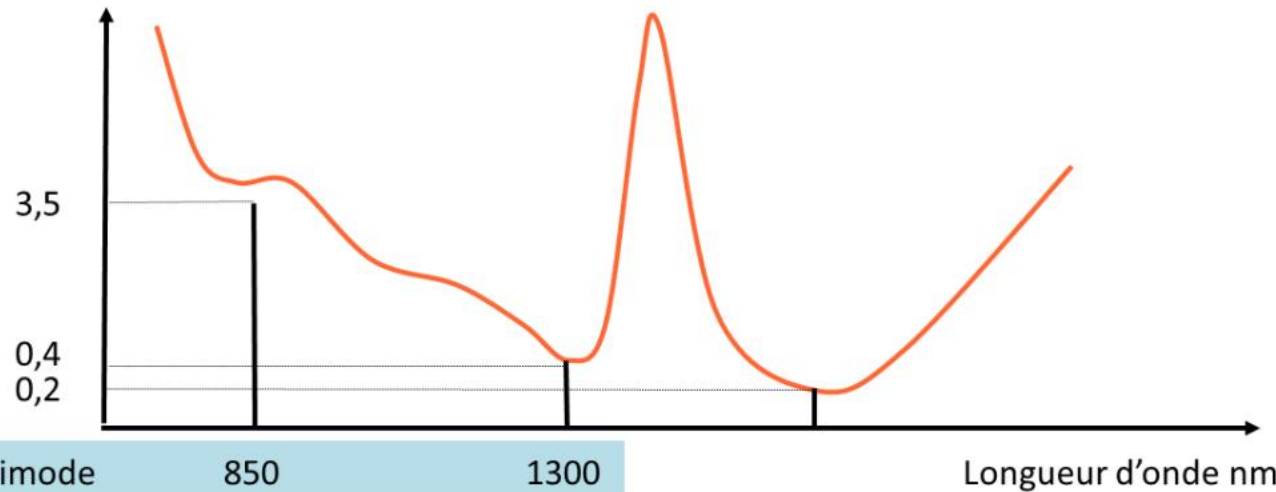
$$p_i(t) = A \cos(2\pi f_{p_i} t + \varphi)$$

Voie montante : 1260 à 1360nm

Voie descendante : 1480 à 1580nm

WDM (*Wavelength Division Multiplexing*)

Atténuation (dB/km)



multimode

850

1300

Longueur d'onde nm

monomode

1310

1550

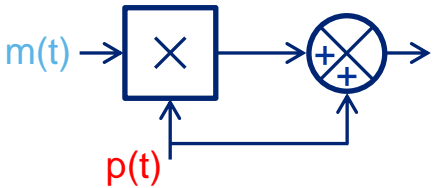
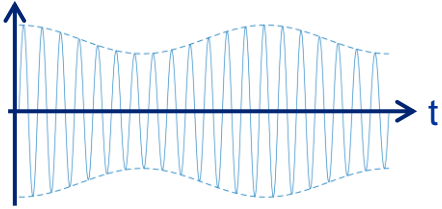
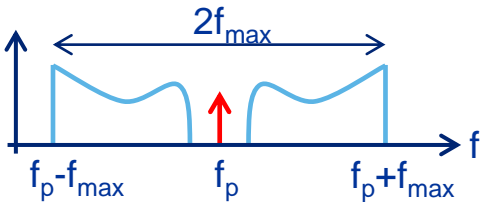
# 2. Modulation d'amplitude

## Les différentes MA

	Modulateur	Allure temporelle (modulant sinus)	Allure fréquentielle
Porteuse conservée			
Porteuse supprimée			
Bande latérale unique			
Bande latérale atténuée			

# 2. Modulation d'amplitude

## Démodulation non cohérente

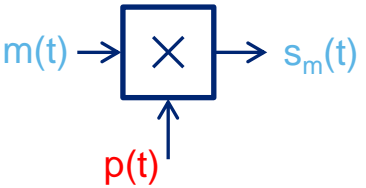
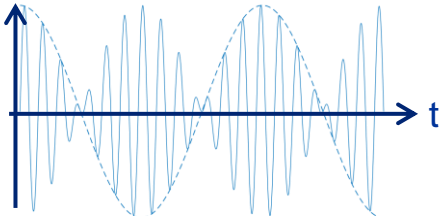
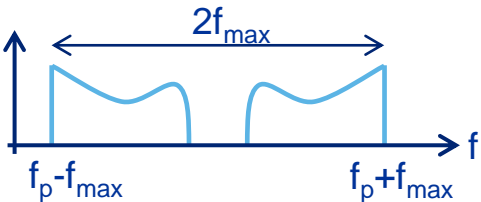
	Modulateur	Allure temporelle (modulant sinus)	Allure fréquentielle
Porteuse conservée			

L'enveloppe du signal modulé est l'image du modulant → détection d'enveloppe (si pas de sur-modulation)

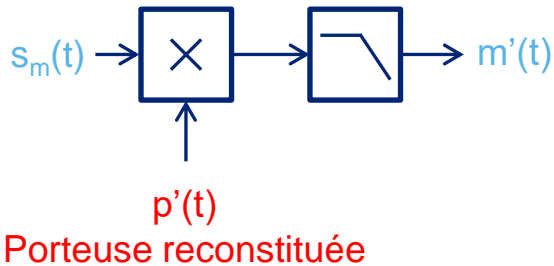
Transmission optique : photodiode ↔ démodulateur non cohérent

# 2. Modulation d'amplitude

Démodulation cohérente (ou synchrone)

	Modulateur	Allure temporelle (modulant sinus)	Allure fréquentielle
Porteuse supprimée			

Interprétation de la modulation comme une transposition de fréquence → démodulation par transposition inverse



Problématique de la phase de la porteuse reconstituée :

$$p(t) = A \cos(2\pi f_p t)$$

$$p'(t) = A \cos(2\pi f_p t + \varphi)$$

→ Modulation par  $\cos(\varphi)$

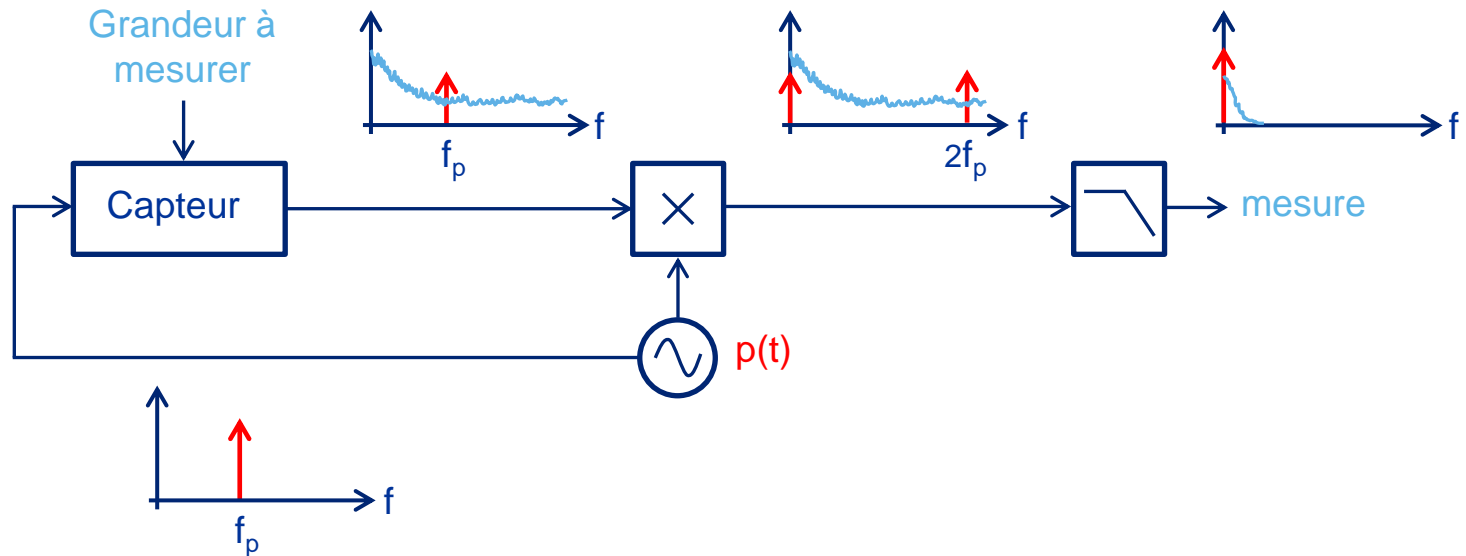


# 2. Modulation d'amplitude

Lien avec la détection synchrone

Idée : améliorer le rapport signal à bruit en « adaptant » le traitement au bruit

Objectif : détecter (mesurer) un signal (sinusoïdal) de fréquence connue noyé dans un bruit

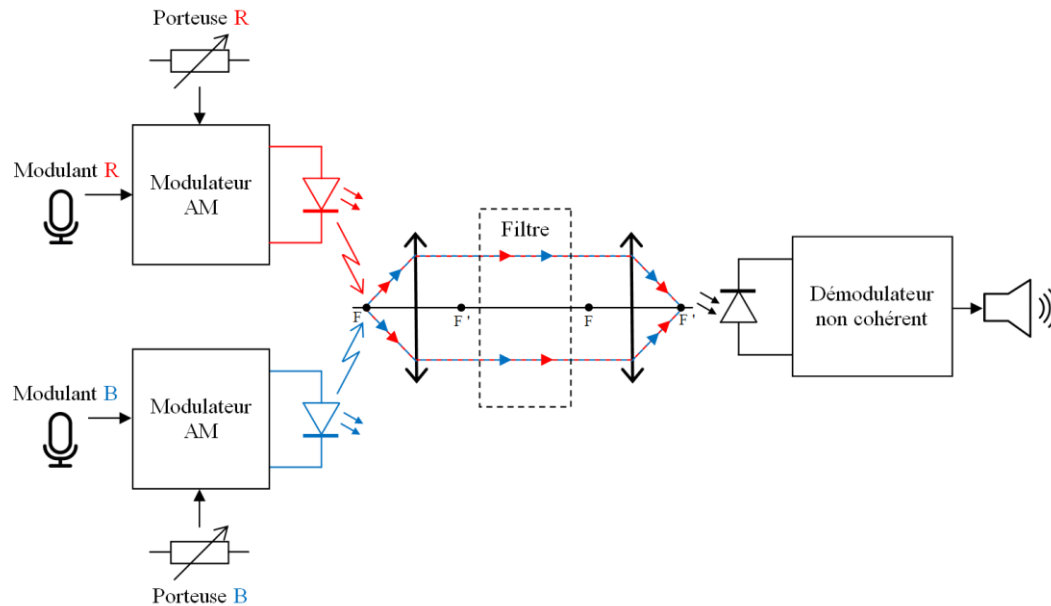


# 2. Modulation d'amplitude

## Activité expérimentale

### Modulation et démodulation d'amplitude

- Mettre en œuvre une liaison optique à deux canaux en WDM (*Wavelength Division Multiplexing*)
- Mettre en œuvre et caractériser un équivalent électronique de cette liaison
- Rapprocher les deux canaux, illustrer l'impossibilité de séparation par filtrage → démodulation synchrone
- Illustrer la problématique de reconstitution de la porteuse (phase)

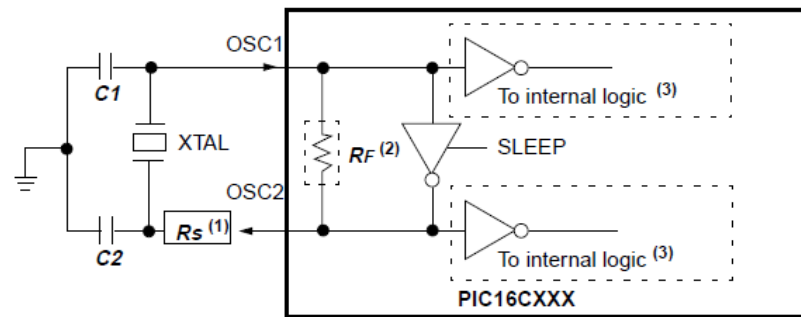
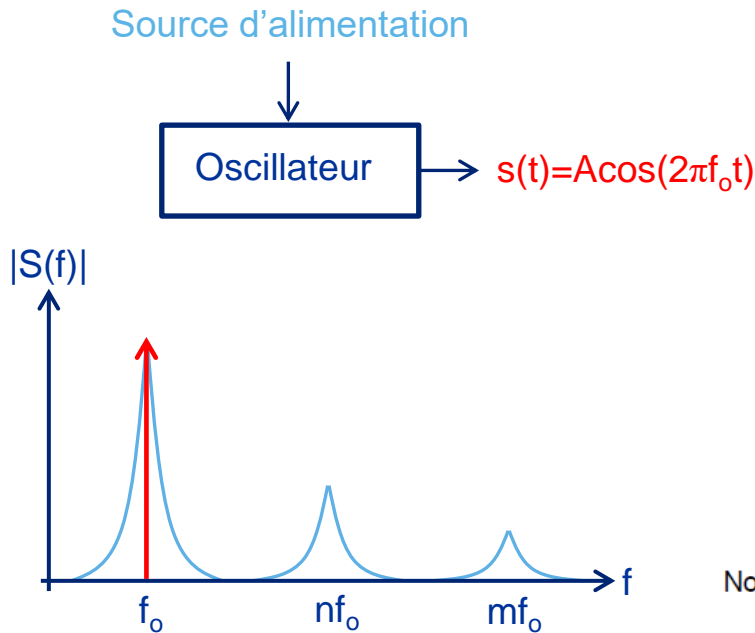


# 3. Les oscillateurs

## Multivibrateurs/oscillateurs quasi-sinusoidaux

Rôle : générer un signal périodique / sinusoïdal de fréquence fixe (ou réglable)

Caractéristiques : stabilité(s) en fréquence, pureté spectrale



- Note 1: A series resistor,  $R_S$ , may be required for AT strip cut crystals.  
Note 2: The feedback resistor,  $R_F$ , is typically in the range of 2 to 10 M $\Omega$ .  
Note 3: Depending on the device, the buffer to the internal logic may be either before or after the oscillator inverter.

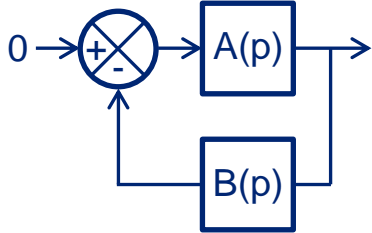
Oscillateur typique d'un microcontrôleur

# 3. Les oscillateurs

## Structure d'un oscillateur quasi-sinusoidal, condition d'oscillation

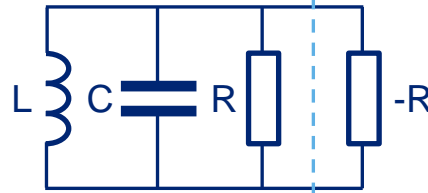
### Différents points de vue

#### Automatique

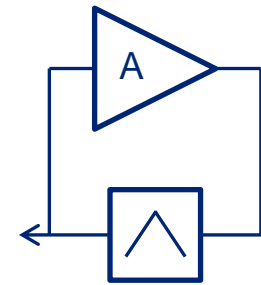


#### Physique

Cellule résonnante amortie (avec pertes)      Compensation des pertes



#### Electronique



Condition d'oscillation de Barkhausen :  $A(j\omega_o).B(j\omega_o) = -1 \leftrightarrow \begin{cases} |A(j\omega_o).B(j\omega_o)| = 1 \\ \arg(A(j\omega_o)) + \arg(B(j\omega_o)) = \pi (+2k\pi) \end{cases}$

Condition de démarrage des oscillations :  $|A(j\omega_o).B(j\omega_o)| > 1$

Les non-linéarités (amplificateur) limitent l'amplitude des oscillations :  $A_{eqNL}(j\omega_o).B(j\omega_o) = -1$

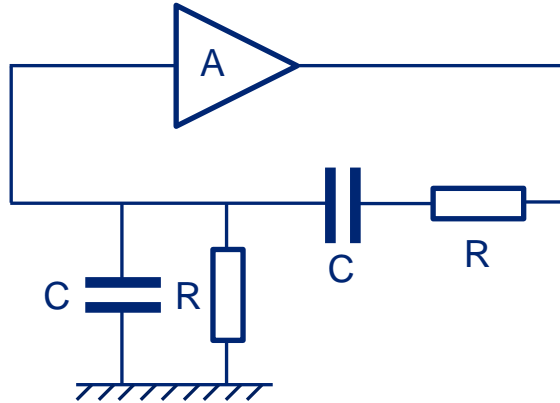
$\leftrightarrow \begin{cases} |A_{eqNL}(j\omega_o).B(j\omega_o)| = 1 \rightarrow \text{amplitude des oscillations} \\ \arg(A_{eqNL}(j\omega_o)) + \arg(B(j\omega_o)) = \pi (+2k\pi) \rightarrow \text{fréquence des oscillations} \end{cases}$

# 3. Les oscillateurs

## Activité expérimentale

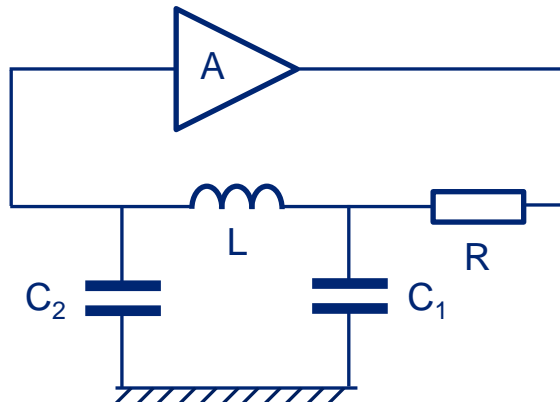
### Pont de Wien :

Conditions d'oscillation, étude du démarrage, stabilisation de l'amplitude, pureté spectrale.



### Colpitts:

Stabilité en fréquence, jitter, bruit de phase. Comparaison à un oscillateur à quartz (Pierce)

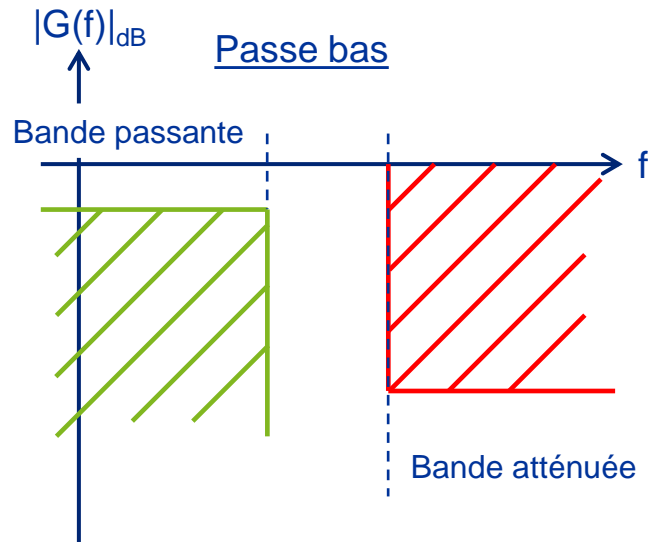


# 4. Filtrage analogique

## Gabarits, fonctions de transfert/d'approximation

Objectifs du filtrage:

- Supprimer (atténuer) un signal parasite
- Sélectionner une portion (fréquentielle) d'un signal
- Donner des propriétés particulières à un système (ex : égalisation d'une salle d'écoute)
- Donner des propriétés particulières à un signal (ex : filtres en cosinus surélevés en communications numériques)

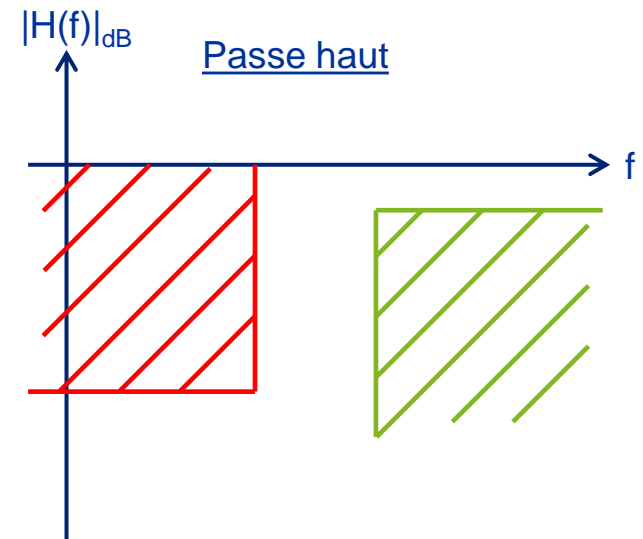
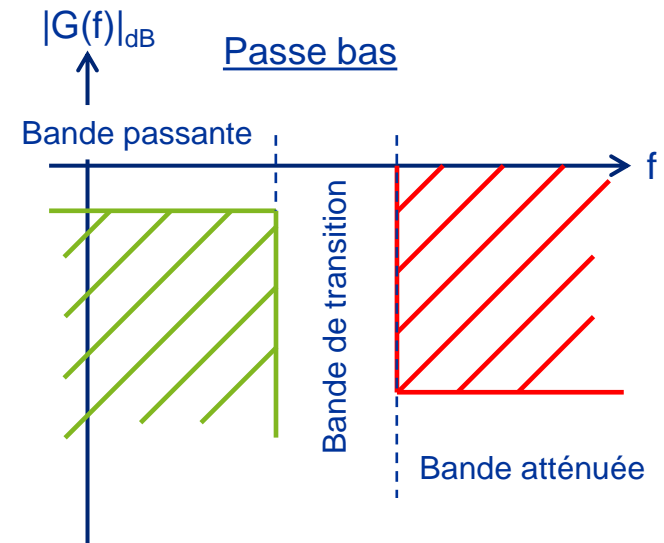


Données du problème de filtrage  
Cahier des charges

Gabarit de filtre (en gain)

## 4. Filtrage analogique

Synthèse de filtre : méthodologie

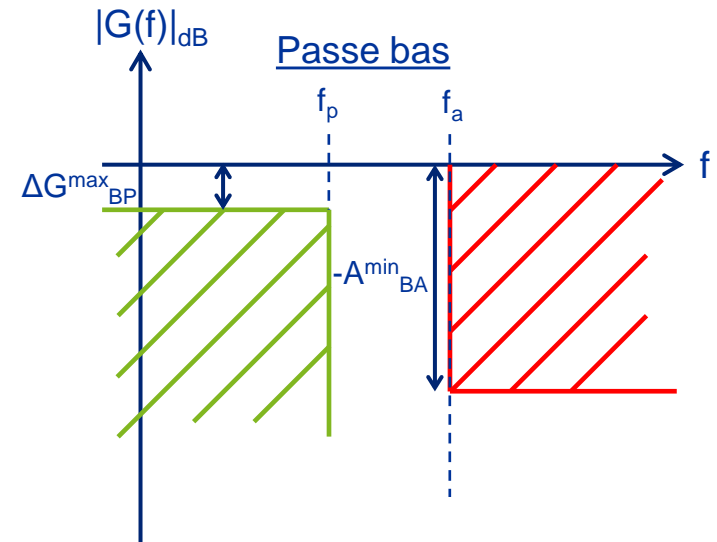


Données du problème de filtrage  
Cahier des charges

Gabarit de filtre (en gain)

## 4. Filtrage analogique

Synthèse de filtre : méthodologie



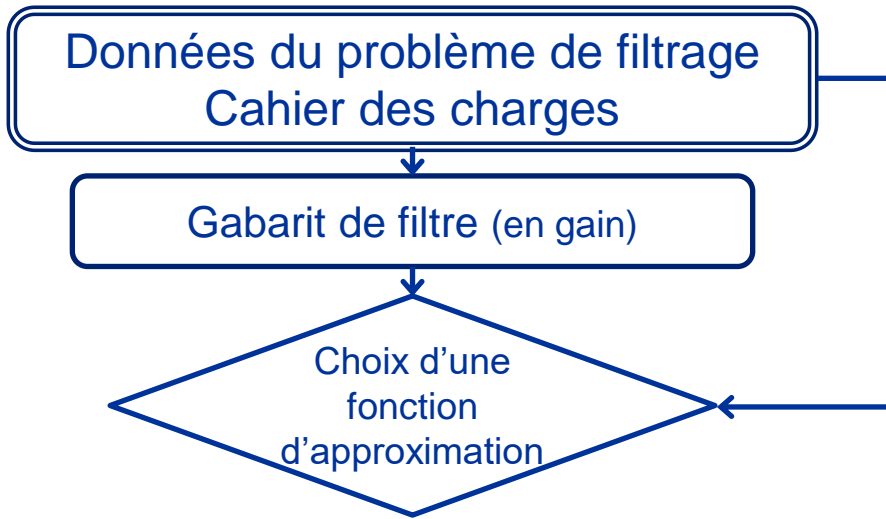
Bande occupée du signal utile  $\rightarrow f_p$

Altération tolérable du signal utile  $\rightarrow \Delta G_{BP}^{max}$

Plus faible fréquence à atténuer  $\rightarrow f_a$

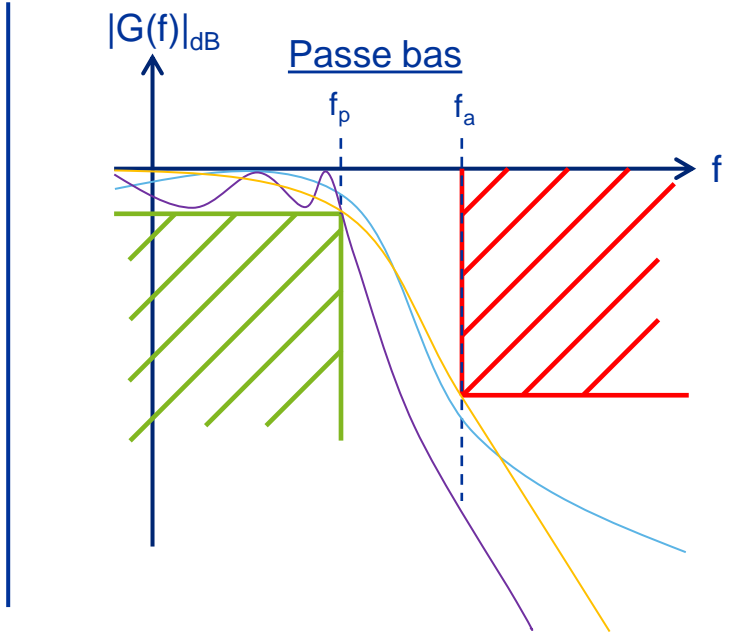
Atténuation minimale au-delà de cette fréquence  $\rightarrow A_{BA}^{min}$





# 4. Filtrage analogique

Synthèse de filtre : méthodologie



Un gabarit → une infinité de fonctions de transfert : comment choisir ?

Certaines FT présentent des propriétés « intéressantes » :

- Butterworth : gain le + plat dans la BP
- Tchebychev : pente la + raide dans la BT
- Bessel : tps de propagation de groupe le + constant dans la BP
- Cauer : ordre minimal à gabarit donné

Données du problème de filtrage  
Cahier des charges

Gabarit de filtre (en gain)

Choix d'une  
fonction  
d'approximation

## 4. Filtrage analogique

Synthèse de filtre : méthodologie

- Butterworth : gain le + plat dans la BP
- Tchebychev : pente la + raide dans la BT
- Bessel : tps de propagation de groupe le + constant dans la BP
- Cauer : ordre minimal à gabarit donné

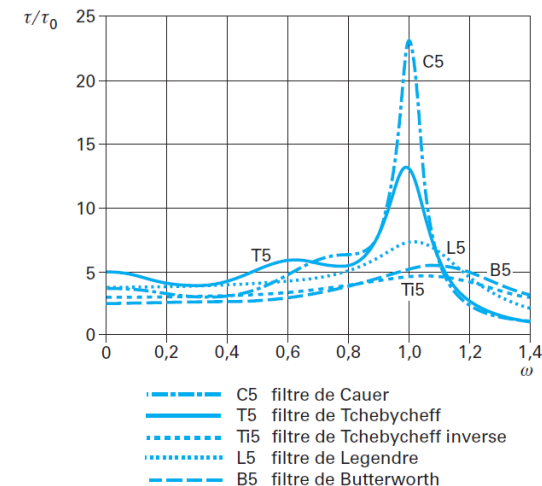
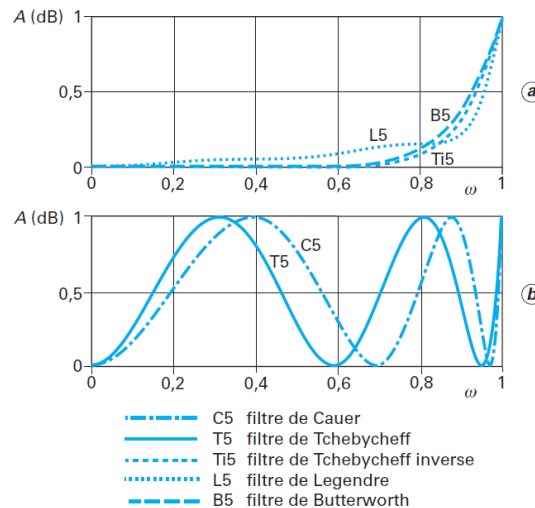
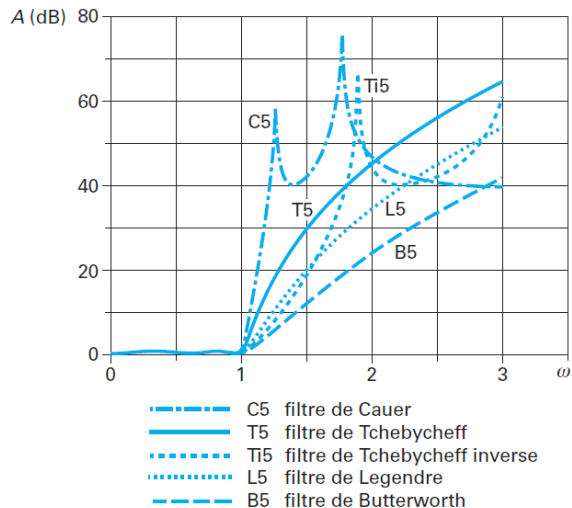


Figure 21 – Comparaison entre les affaiblissements de cinq filtres analytiques d'ordre 5

Figure 22 – Réponse en bande passante des filtres de la figure 21

Figure 23 – Réponse comparée en temps de propagation de group des filtres de la figure 21

Données du problème de filtrage  
Cahier des charges

Gabarit de filtre (en gain)

Choix d'une  
fonction  
d'approximation

Fonction de transfert

## 4. Filtrage analogique

Synthèse de filtre : méthodologie

Filtres polynomiaux

Filtres non polynomiaux (ou elliptiques)

L'ordre du filtre dépend du gabarit ET du  
choix de la fonction d'approximation

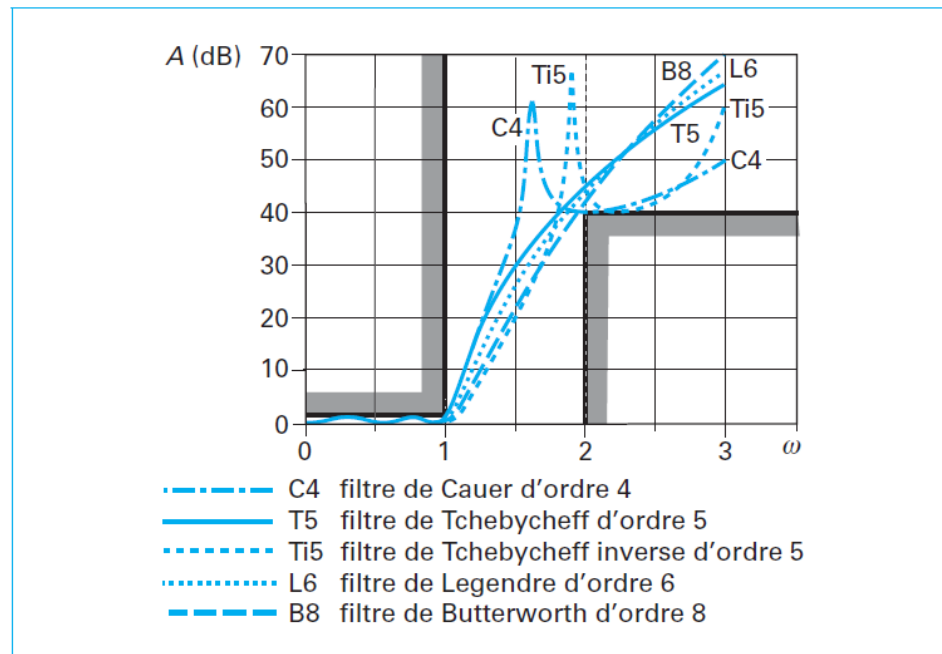


Figure 24 – Réponse comparée de cinq filtres analytiques répondant aux spécifications d'un même gabarit d'affaiblissement

Données du problème de filtrage  
Cahier des charges

Gabarit de filtre (en gain)

Choix d'une  
fonction  
d'approximation

Fonction de transfert

Choix d'une  
mise en œuvre

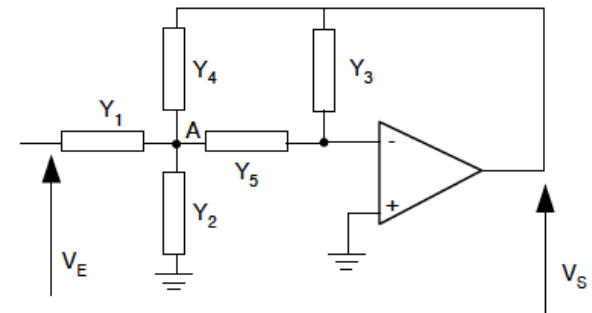
## 4. Filtrage analogique

Synthèse de filtre : méthodologie

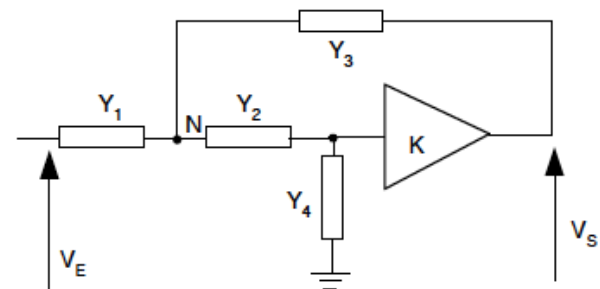
Filtres passifs / actifs

Mise en cascade de cellules d'ordre 1 ou 2

Utilisation de composants discrets  
RLC+AOP ou distribués



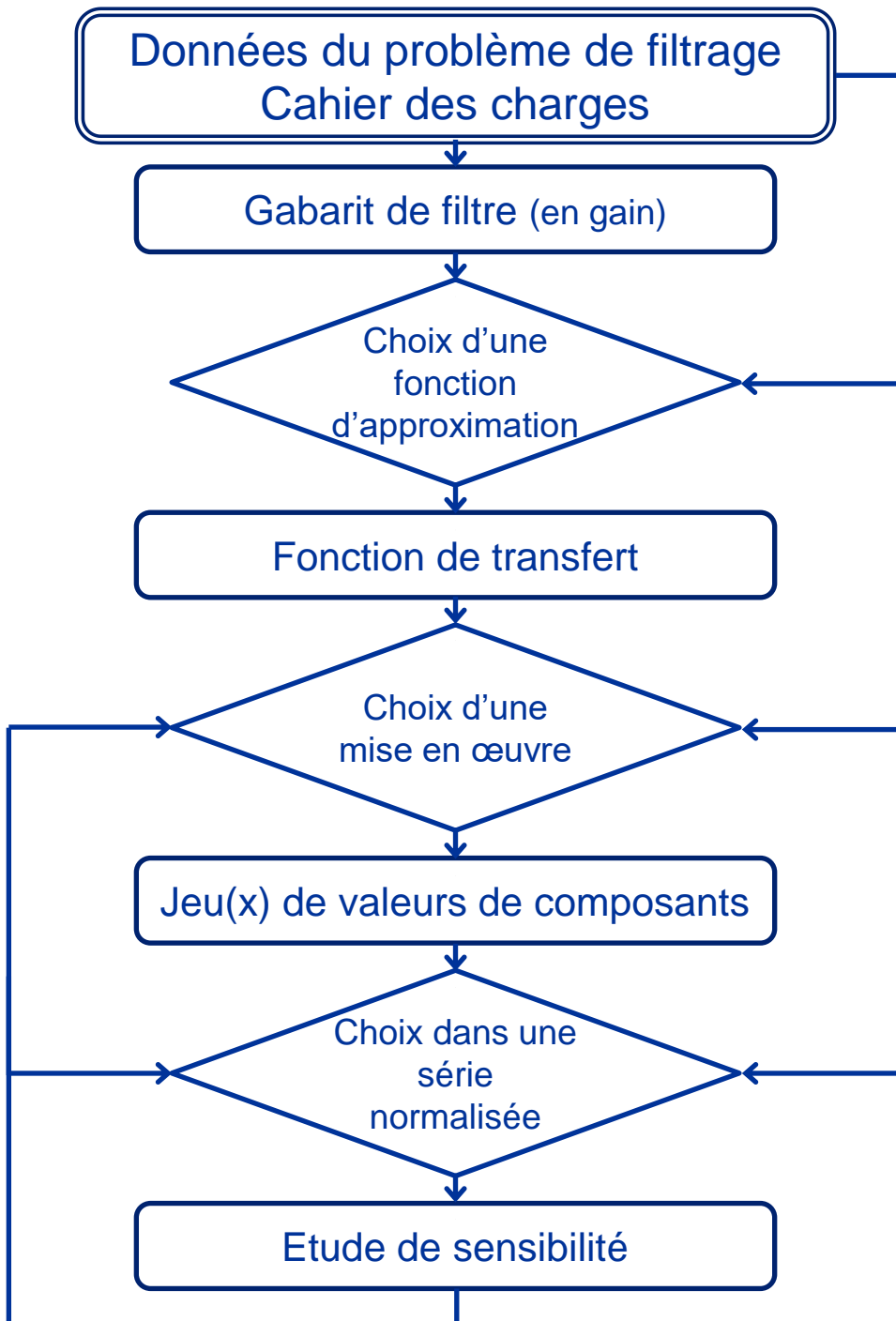
Structure d'ordre 2 de Rauch  
(ou Multiple Feedback)



Structure d'ordre 2 de Sallen Key

# 4. Filtrage analogique

## Synthèse de filtre : méthodologie



Prise en compte de critères « autres » : prix, complexité, réglages, bruit, linéarité, impédances d'entrée/sortie ...

# 4. Filtrage analogique

## Exemples



### SPECIFICATIONS

#### ANALOG INPUTS (A, B, C)

Type	electronically balanced
Connector	XLR
Max. input level	+22 dBu
Input impedance	approx. 20 k $\Omega$ at 1 kHz
Crosstalk	-72 dB @ 0 dBu In

#### DIGITAL INPUT (A)

Connector	XLR
Format	S/PDIF or AES/EBU
Input level	0.3 to 10 Vpp
Input impedance	approx. 110 $\Omega$
Sampling frequency	32 to 96 kHz
Special feature	Sample Rate Converter

#### MICROPHONE INPUT (C)

Type	electronically balanced
Connector	XLR
Max. input level	-23 dBu
Input impedance	approx. 470 $\Omega$ at 1 kHz
Phantom supply	+15 V

#### ANALOG OUTPUTS (1, 2, 3, 4, 5, 6)

Type	electronically balanced
Connector	XLR
Max. output level	+22 dBu
Output impedance	approx. 160 $\Omega$ at 1 kHz
Crosstalk	-100 dB @ 10 dBu In

#### SYSTEM DATA

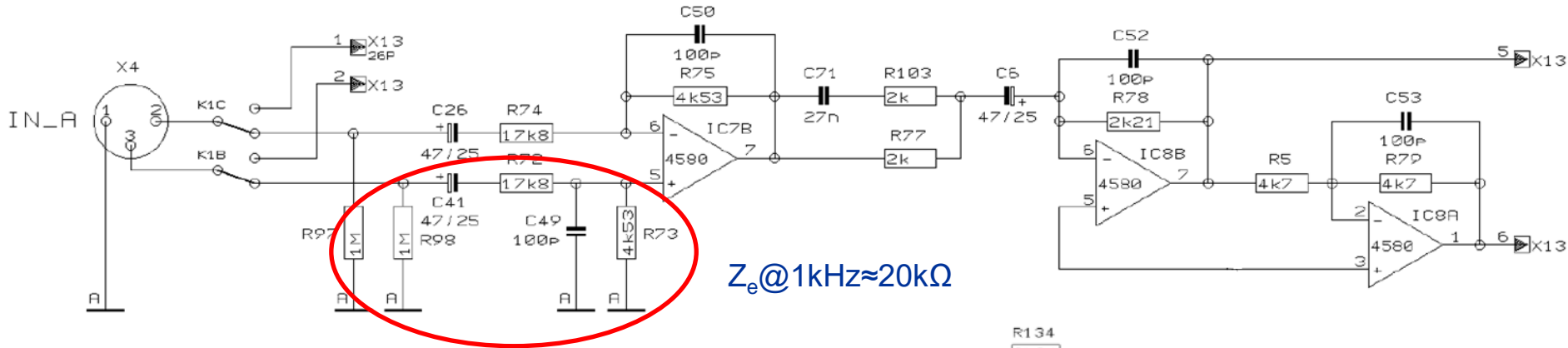
Sampling frequency	96 kHz
Signal delay	< 1 ms
Frequency response	Analog input to analog output 10 Hz to 35 kHz (-1 dB) typ.
Dynamic range	109 dB
(analog input $\rightarrow$ analog output)	
Input noise	-90 dBu (@ +22 dBu $\rightarrow$ 112 dB)
Output noise	-90 dBu (@ +22 dBu $\rightarrow$ 112 dB)
THD+N Ratio	0,007 % @ 0 dBu In, Gain 1 0,004 % @ 10 dBu In, Gain 1

#### CONVERTERS

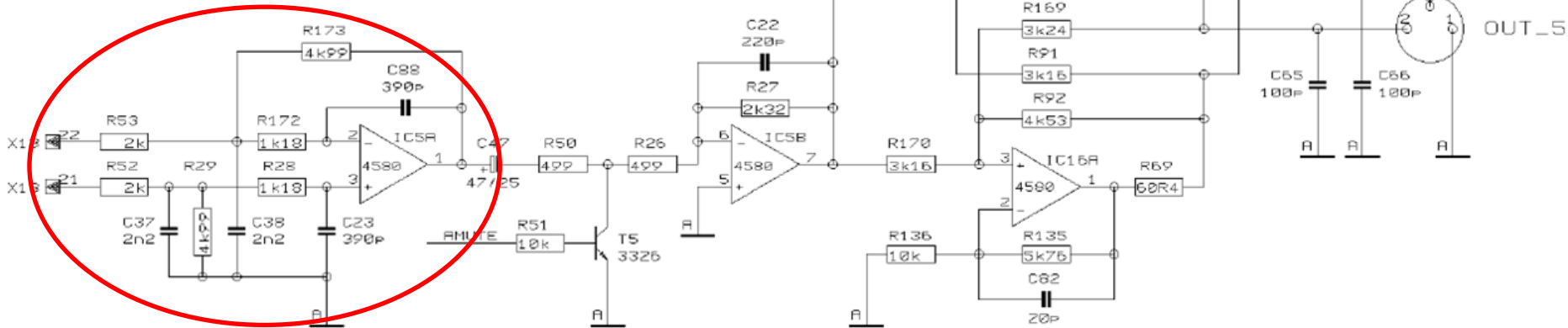
A/D converter	
Resolution	24-Bit Delta-Sigma AKM*
Oversampling	64x
Dynamic range	112 dB typ.
D/A converter	
Resolution	24-Bit Delta-Sigma AKM*
Oversampling	64x
Dynamic range	112 dB typ.

# 4. Filtrage analogique

## Exemples



Structure d'ordre 2 de Rauch  
(version différentielle)



# 4. Filtrage analogique

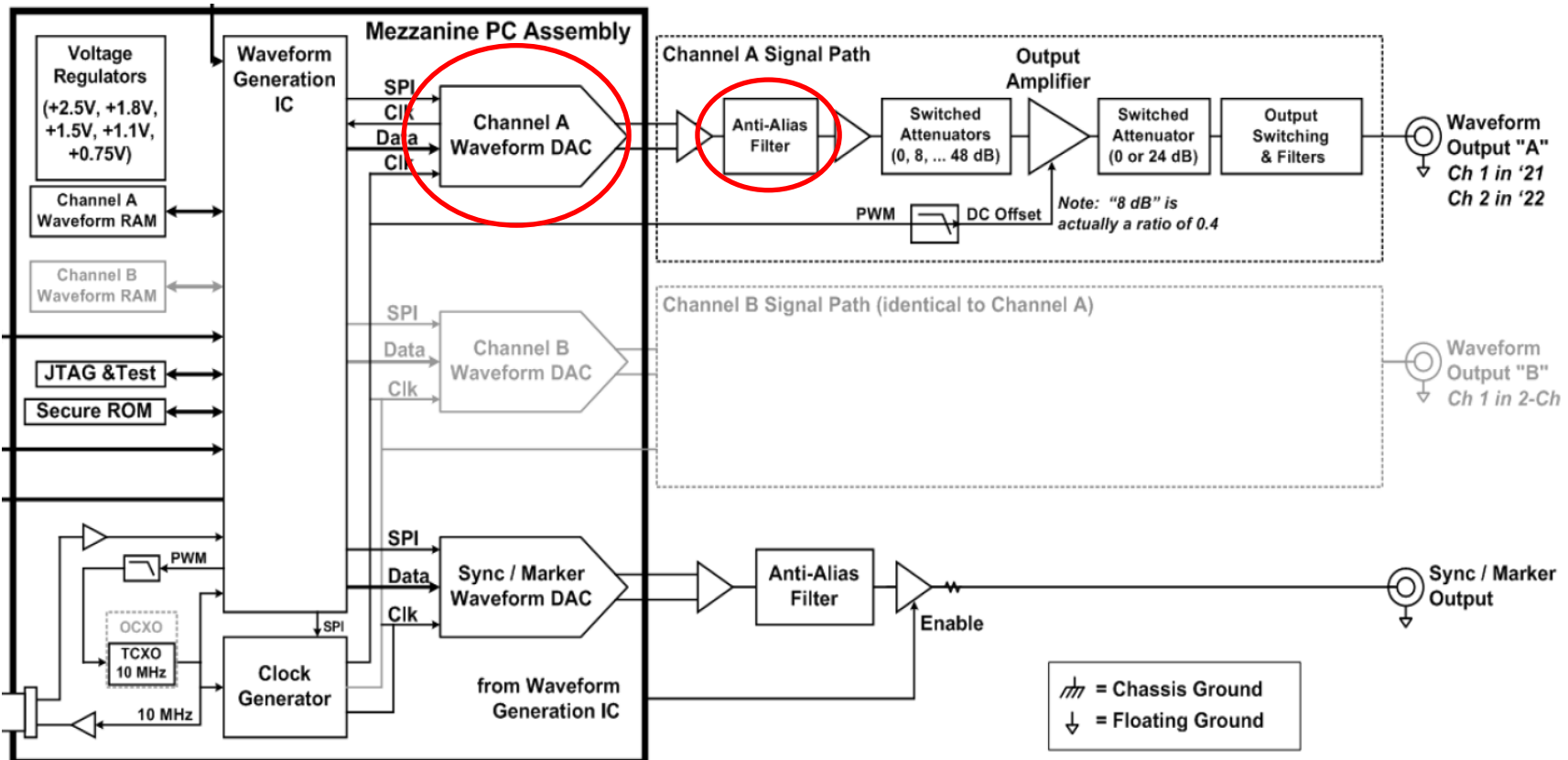
## Exemples



The 14 bit waveform DAC, U901, is loaded with data from the Synthesis IC, U501. Data is clocked using the 50 MHz WFDAC\_CLK from U602.

The differential output of the DAC is applied to one of two filters

- A 9<sup>th</sup> order elliptical filter with a cutoff frequency of 23.5 MHz. This filter includes  $\sin(x)/x$  correction. This filter is used for continuous sine and squarewaves.
- A 7<sup>th</sup> order linear phase filter with a cutoff frequency of 12.5 MHz. This filter is used for ramp, noise, and arbitrary waveforms.

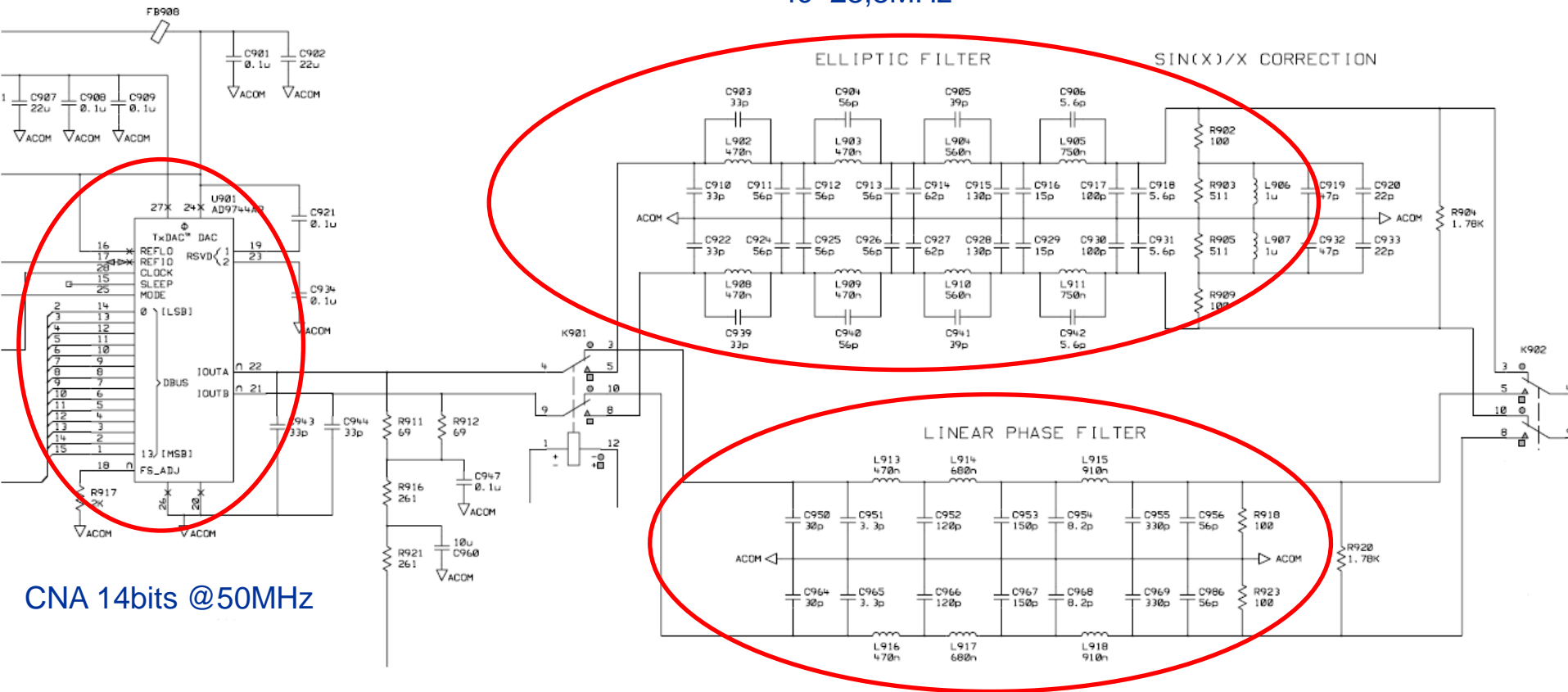




# 4. Filtrage analogique

## Exemples

Filtere elliptique ordre 9  
 $f_c = 23,5\text{MHz}$



CNA 14bits @50MHz

Filtere de Bessel ordre 7  
 $f_c = 12,5\text{MHz}$

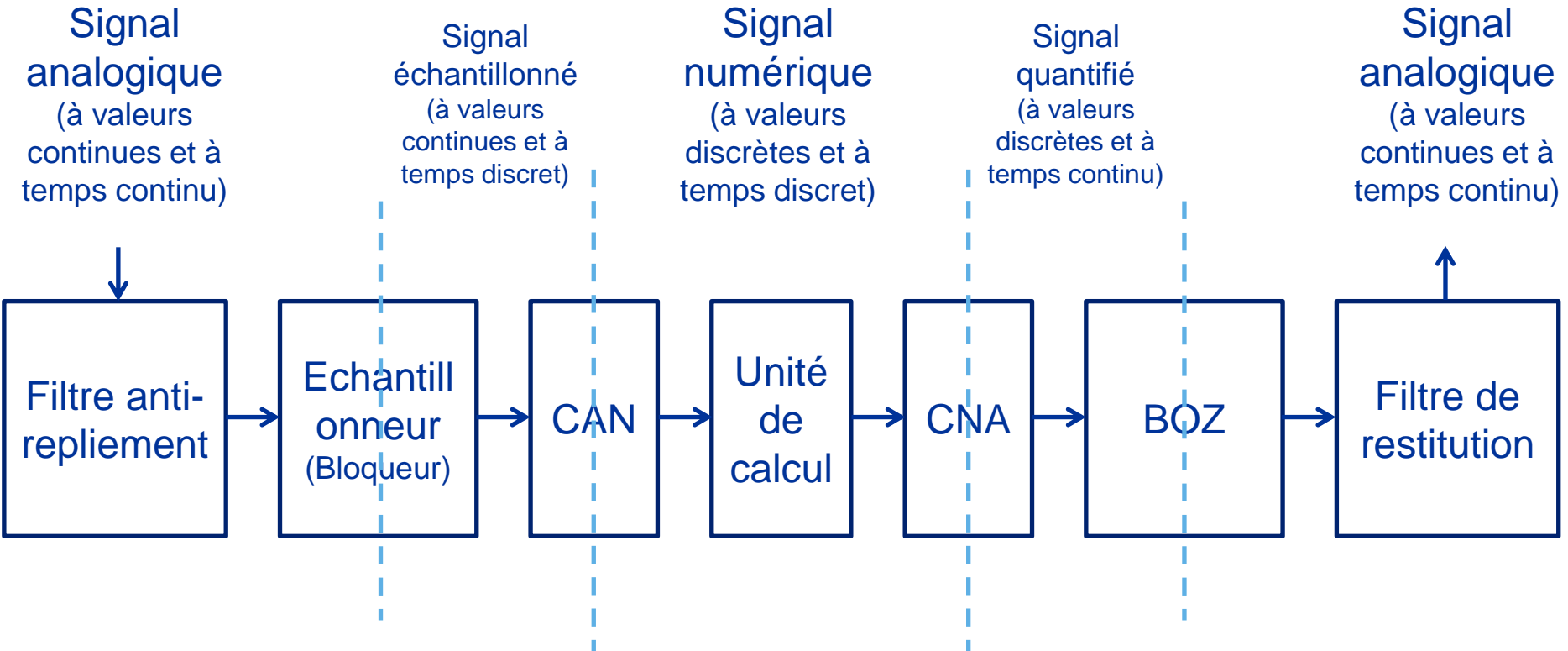
# 4. Filtrage analogique

## Activité expérimentale

- Utiliser un logiciel de synthèse de filtre (FilterPro) : illustrer le choix de la fonction d'approximation et mise en œuvre (cellules actives à AOP)
- Utiliser un logiciel de simulation électronique (LTSpice) pour prédire le comportement d'un filtre, étude statistique de sensibilité (Monte Carlo)
- Câbler deux cellules de filtrage d'ordre 3, un Bessel, un Tchebychev. Analyse comparative, illustrer le rôle des deux filtres internes du GBF
- Caractériser à l'analyseur de spectre ce filtre interne, comparer à la simulation

# 5. Filtrage numérique

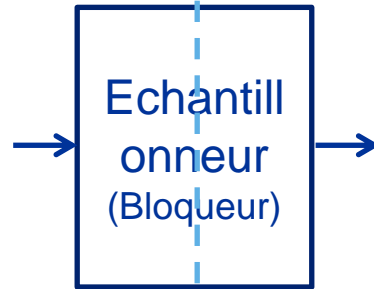
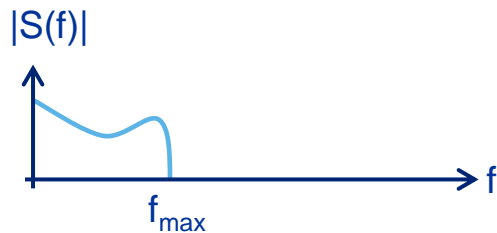
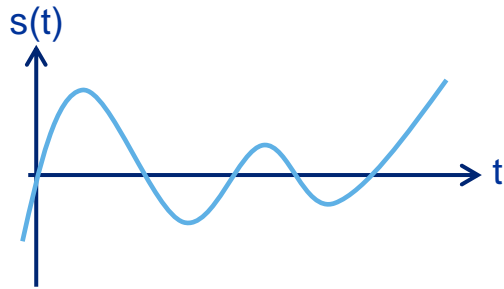
Chaîne de traitement numérique du signal



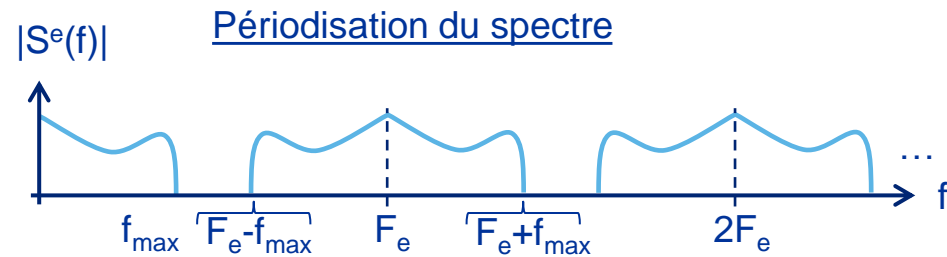
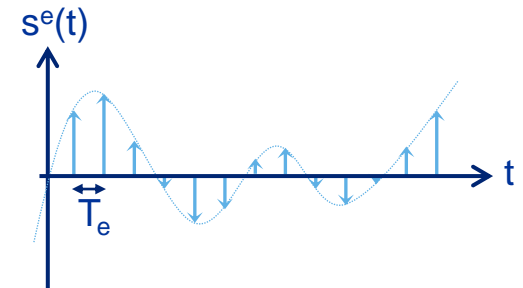
# 5. Filtrage numérique

## Echantillonnage

Signal analogique



Signal échantillonné idéal



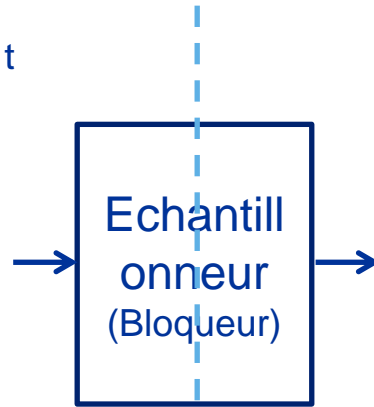
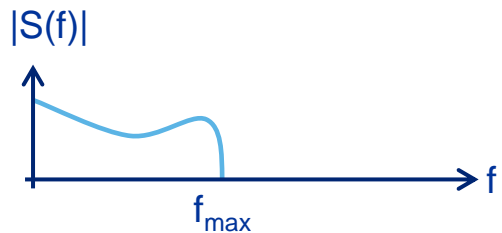
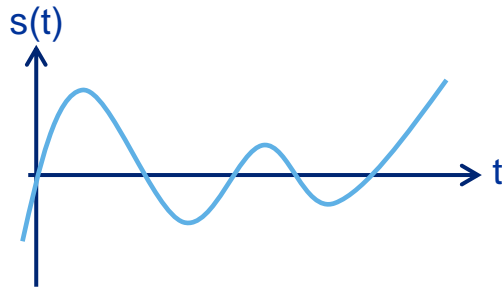
Cas où :  $f_{\max} < F_e - f_{\max}$

càd :  $2f_{\max} < F_e$  Condition de Nyquist - Shannon

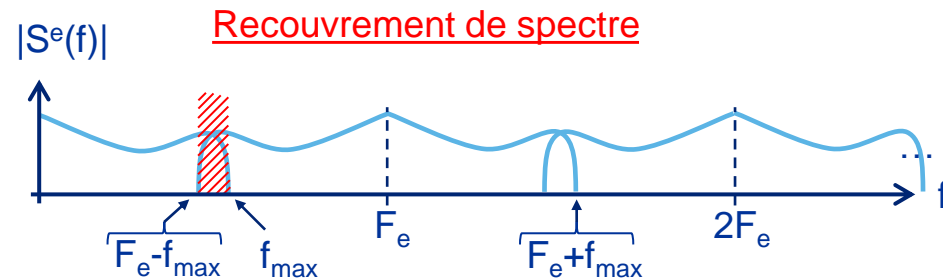
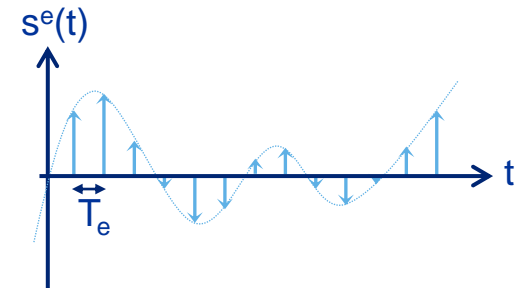
# 5. Filtrage numérique

## Echantillonnage

Signal analogique



Signal échantillonné idéal



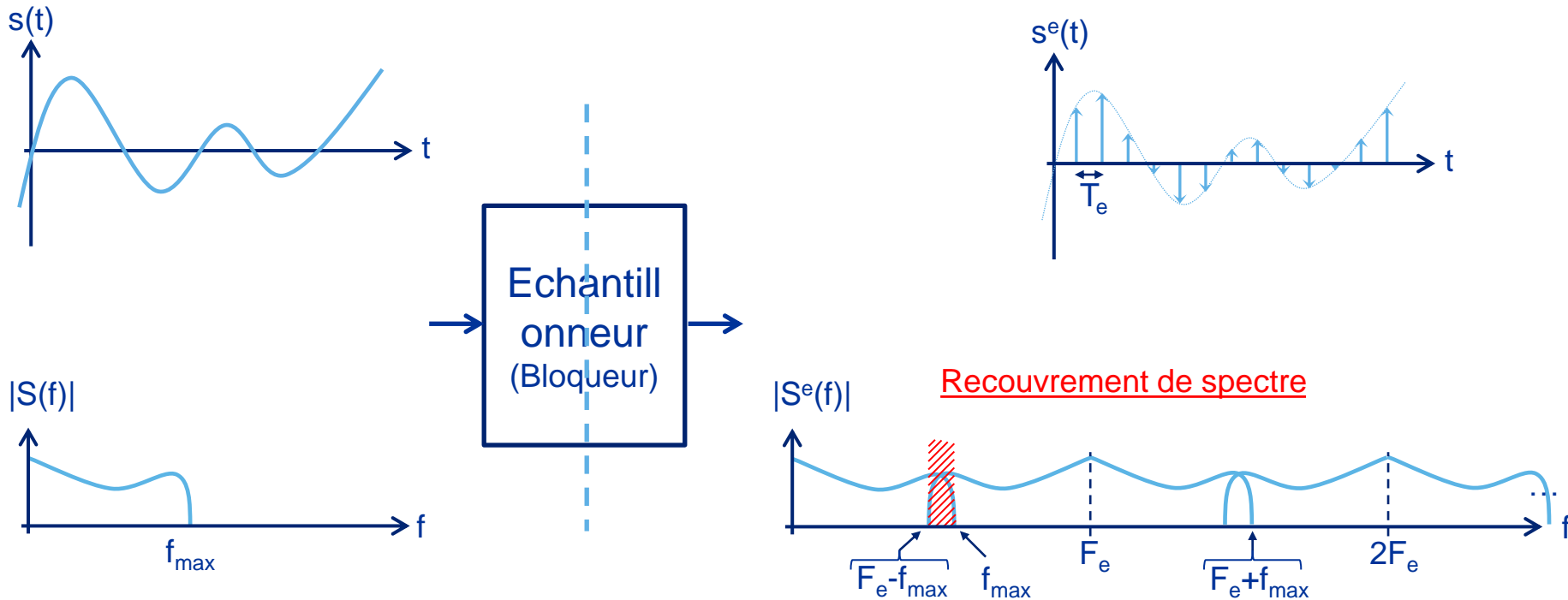
Cas où :  $f_{\max} > F_e - f_{\max}$

càd :  $2f_{\max} > F_e$  Phénomène de recouvrement (engendré par le repliement)

# 5. Filtrage numérique

## Echantillonnage

Echantillonnage idéal, réel, blocage (ordre 0)



Revenir sur GBF :  $\sin x/x$   
correction

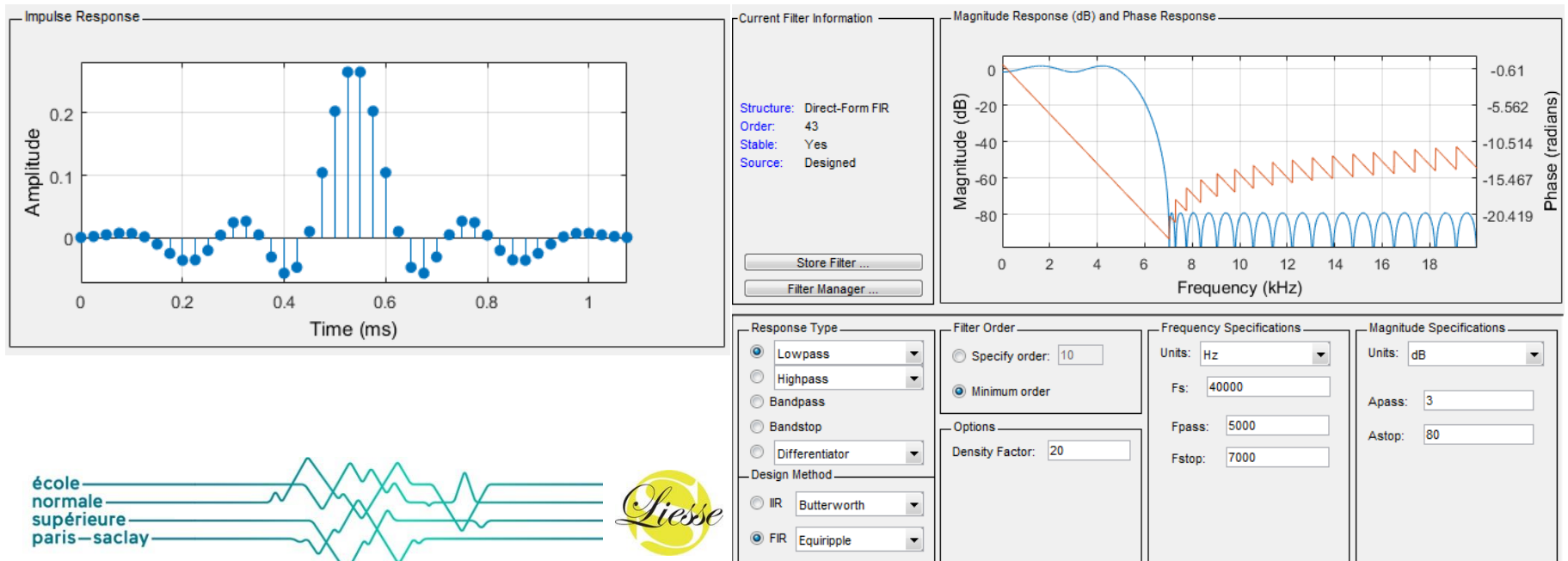
Cas où :  $f_{\max} > F_e - f_{\max}$

càd :  $2f_{\max} > F_e$  Phénomène de recouvrement  
(engendré par le repliement)

# 5. Filtrage numérique

## Activité expérimentale

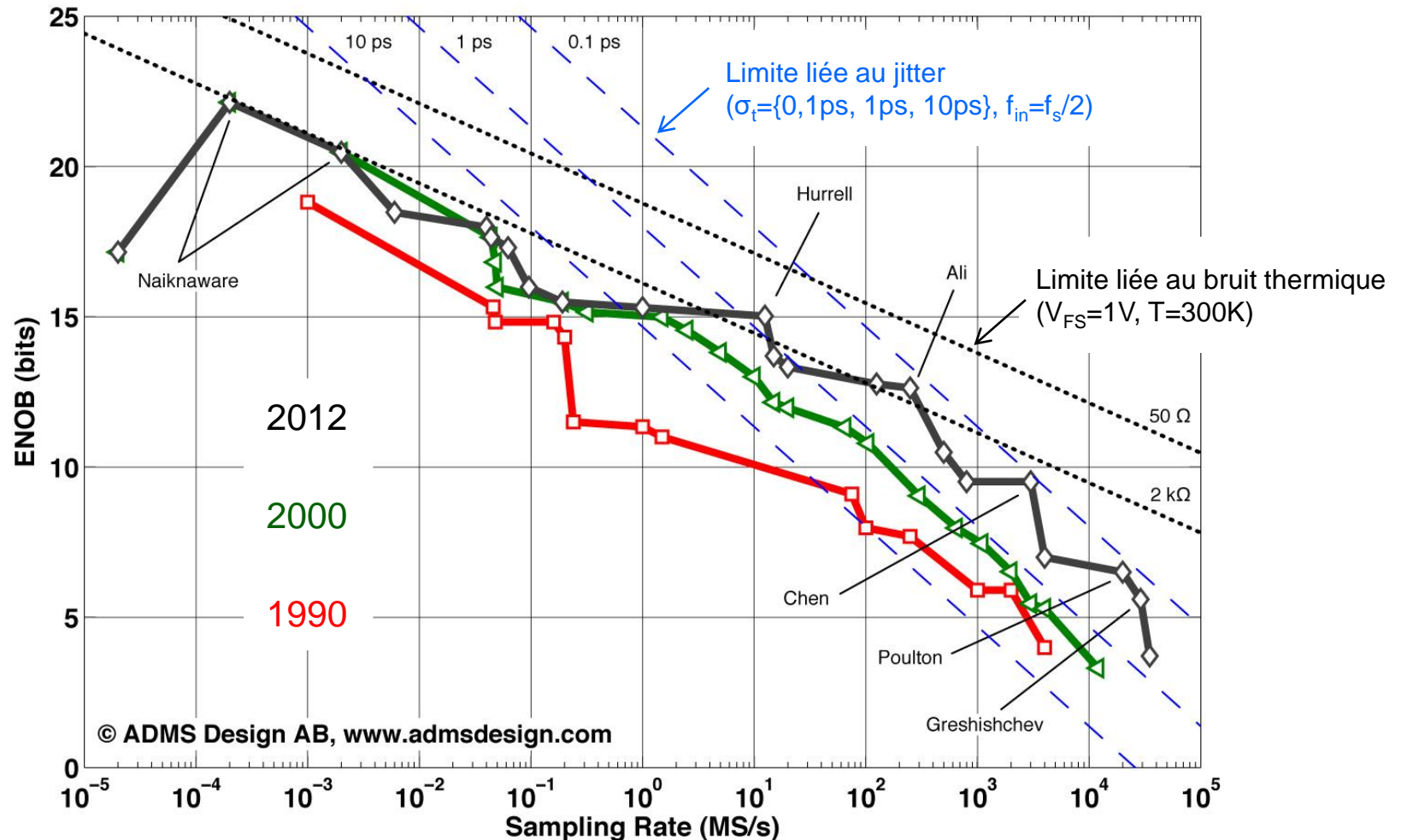
- Illustrer la problématique de l'échantillonnage sur un système de traitement numérique temps réel (à base d'Arduino) pour réaliser un suiveur
- Sur la même cible mettre en œuvre un filtre numérique simple (moyenueur), retrouver les principaux résultats de filtrage
- Illustrer la problématique du temps de calcul



# 6. Oscilloscope numérique

## Quantification

Compromis nombre de bits (effectifs) / fréquence d'échantillonnage

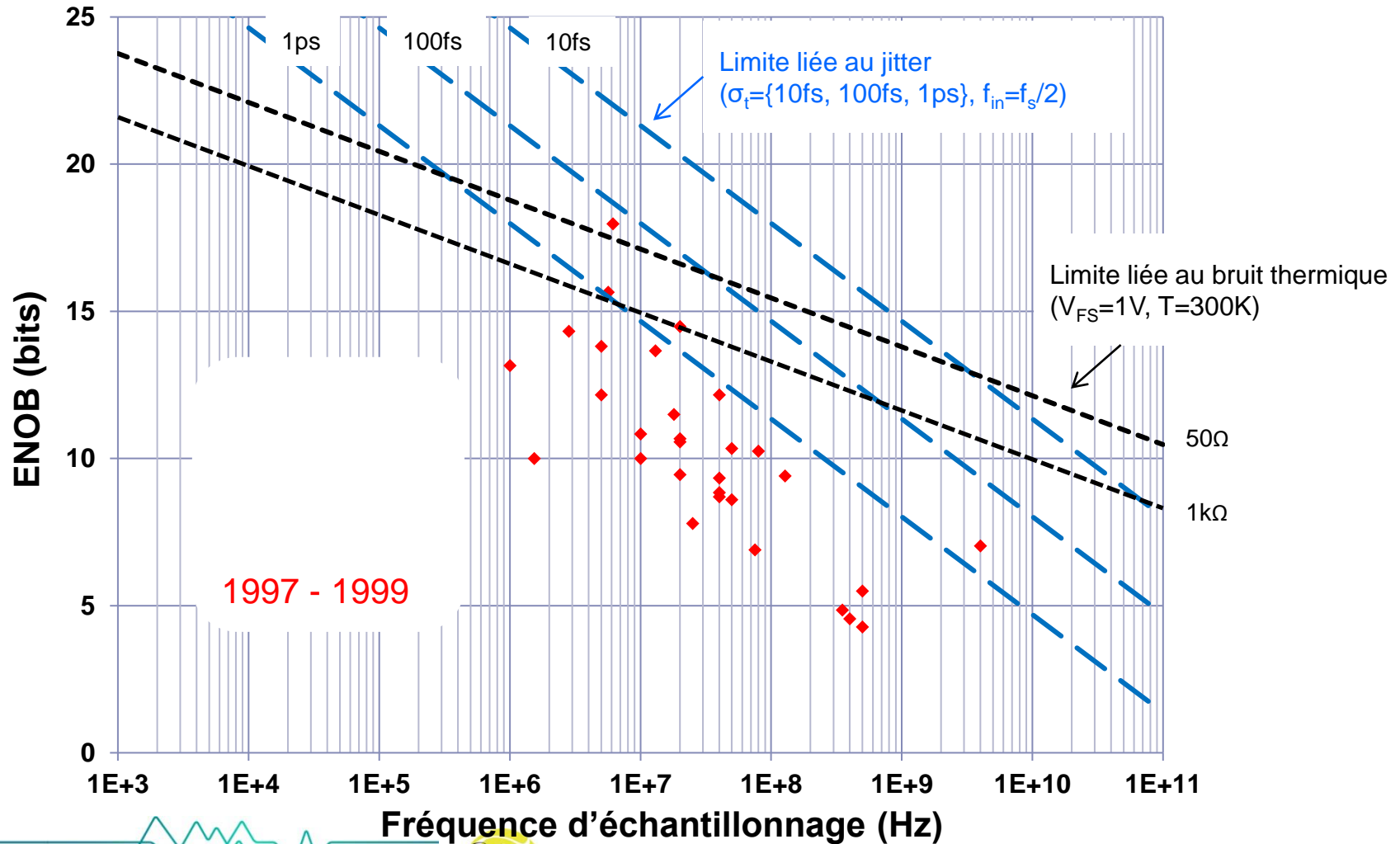




# 6. Oscilloscope numérique

## Quantification

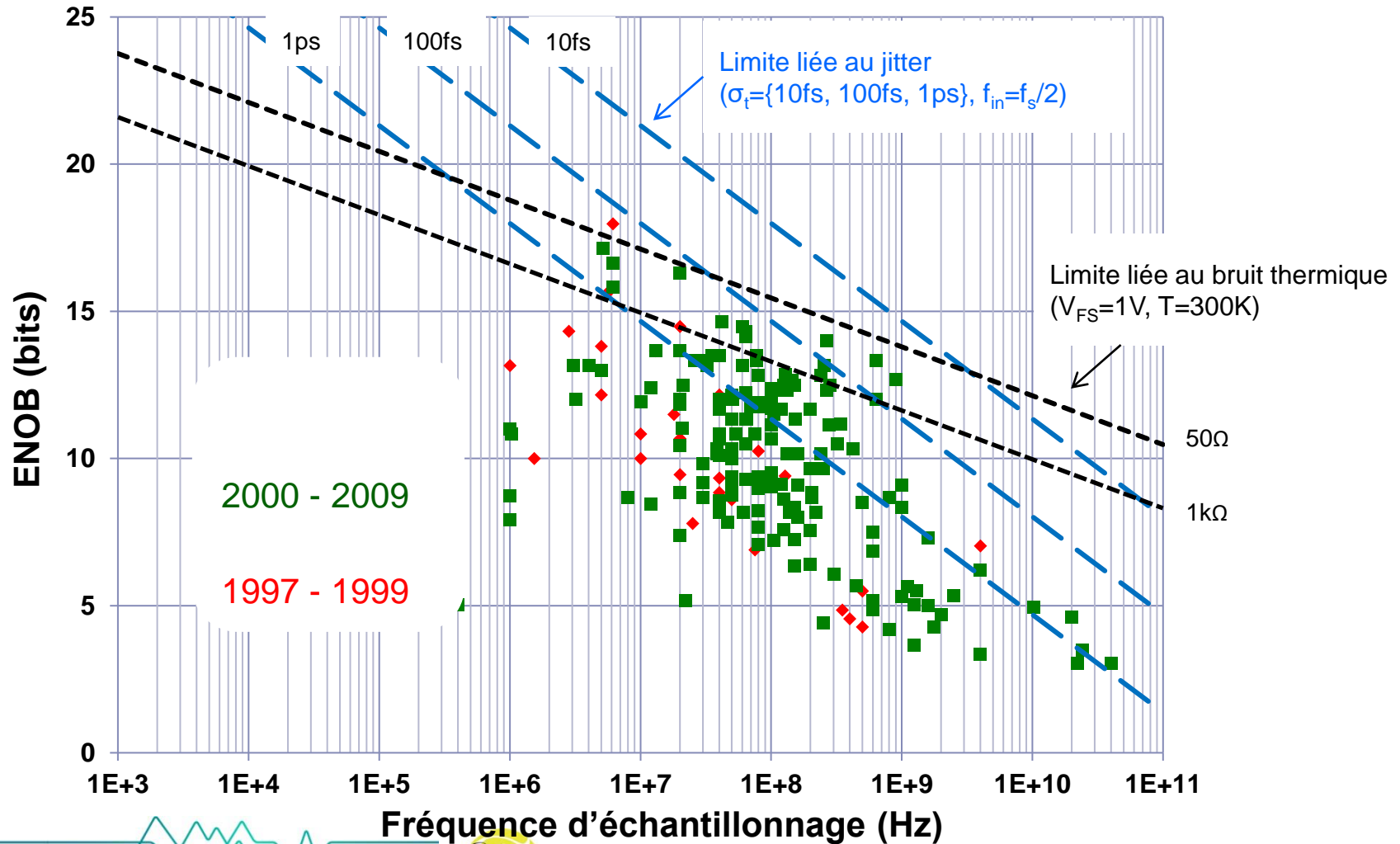
Compromis nombre de bits (effectifs) / fréquence d'échantillonnage



# 6. Oscilloscope numérique

## Quantification

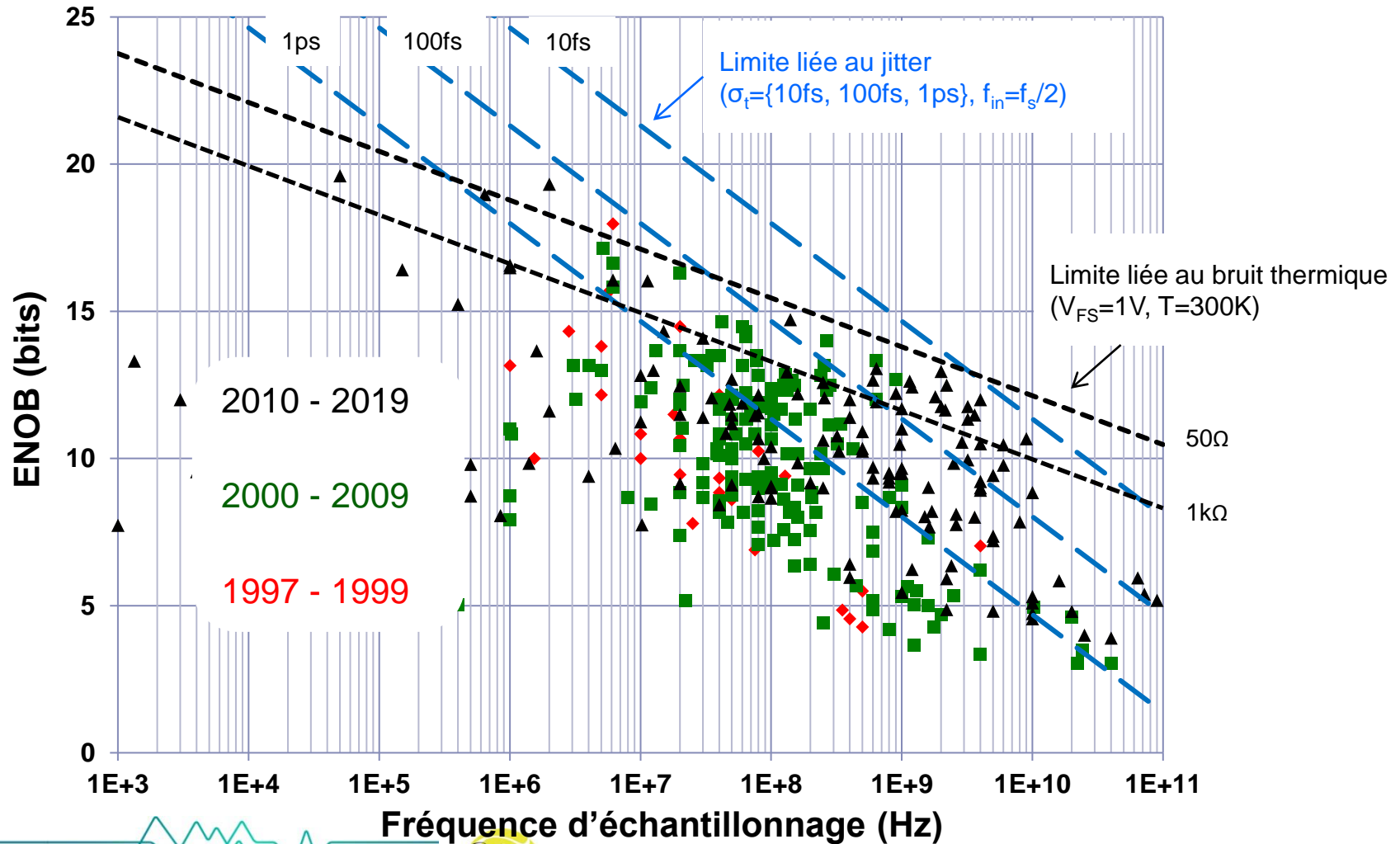
Compromis nombre de bits (effectifs) / fréquence d'échantillonnage



# 6. Oscilloscope numérique

## Quantification

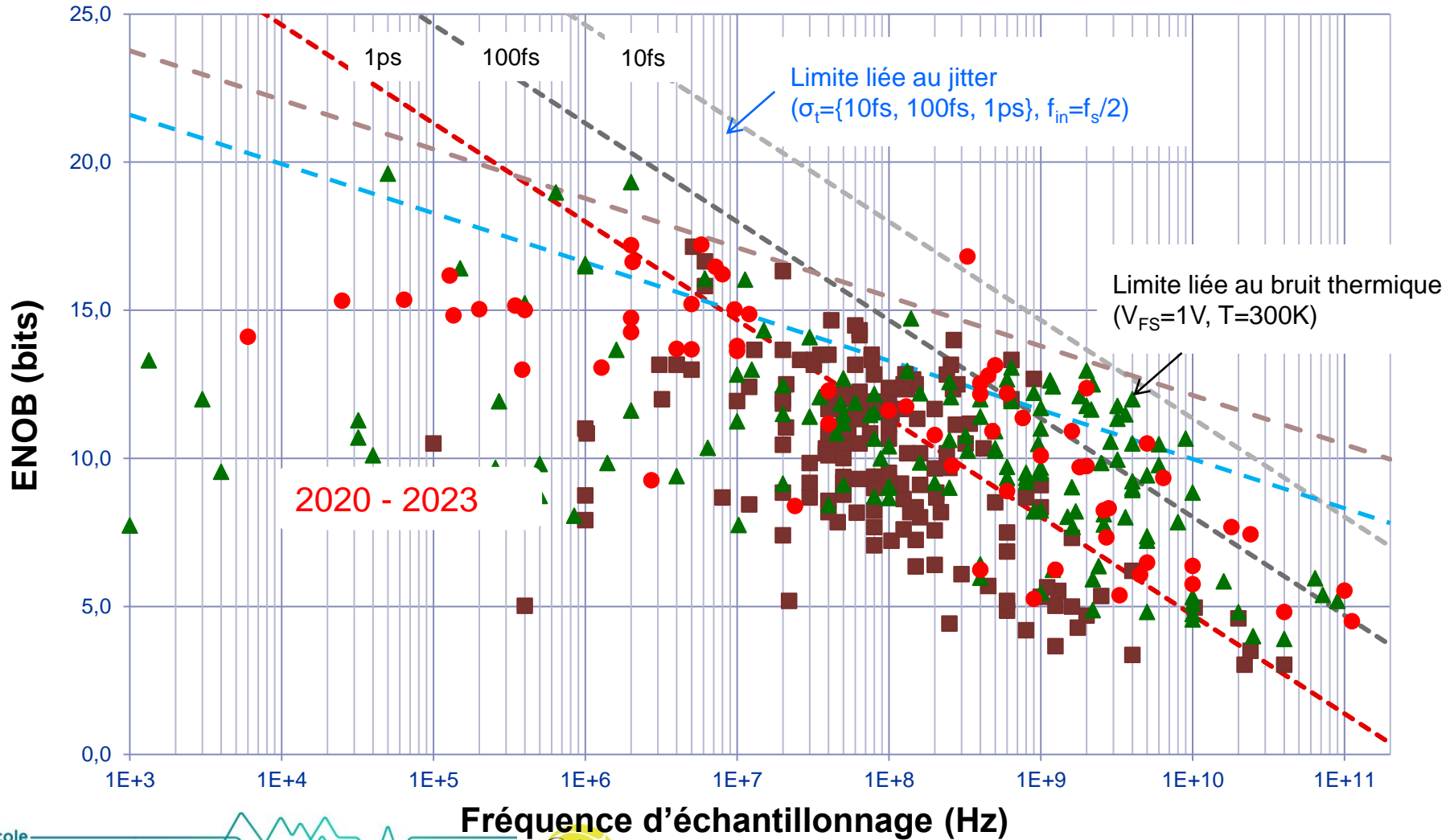
Compromis nombre de bits (effectifs) / fréquence d'échantillonnage



# 6. Oscilloscope numérique





## Quantification

Compromis nombre de bits (effectifs) / fréquence d'échantillonnage




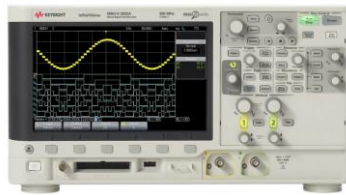


# 6. Oscilloscope numérique

Ce que vous utilisez

	Tektronix TDS 2002C	Metrix DOX2100B	Rohde & Schwarz HMO1002	Tektronix TBS1072C
Photo				
Bande passante (analogique)	70MHz	100MHz	50MHz	70MHz
Fréquence d'échantillonnage	1GS/s	1GS/s / 500MS/s	1GS/s / 500MS/s	1GS/s
ADC	8 bits	8 bits	8 bits	8 bits
Nombre de points / acquisition	2048pts	2Mpts	1Mpts / 500kpts	20000
FFT	2048pts	1024pts	2kpts -> 128kpts	20000
Nombre de voies	2	2	2	2
Prix	Obs	~1000€	~1000€ (Obs)	~900€




# 6. Oscilloscope numérique

Ce que vous utilisez

	Tektronix DPO2012	Keysight DSOX2002A	Keysight DSOX1204A	Rigol MSO5074
Photo				
Bande passante (analogique)	100MHz	70MHz	70MHz	70MHz
Fréquence d'échantillonnage	1GS/s	2GS/s / 1GS/s	2GS/s / 1GS/s	8GS/s / 4GS/s / 2GS/s
ADC	8 bits	8 bits	8 bits	8 bits
Nombre de points / acquisition	1Mpts	1Mpts	2Mpts / 1Mpts	100Mpts / 50Mpts / 25 Mpts
FFT	5000pts	64kpts	64kpts	1Mpts
Nombre de voies	2	2	4	4
Prix	~1500€ (Obs)	~1800€	~1300€	~1100€

# 6. Oscilloscope numérique




Etat de l'art (2017)

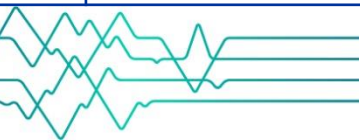
	Keysight DSOZ634A	Tektronix DPO77002SX	Lecroy LabMaster 10 Zi-A
Photo			
Bande passante (analogique)	63GHz	70GHz	100GHz
Fréquence d'échantillonnage	160GS/s	200GS/s	240GS/s
ADC	8 bits	8 bits	8 bits
Nombre de points / acquisition	2Gpts	1Gpts	1,5Gpts
Jitter horloge d'échantillonnage	50fs	<65fs	50fs
Type d'entrée	1,85mm 50Ω	1,85mm 50Ω	1mm 50Ω
ENOB	5,1 bits (@200mVfs)	4.6 bits (@250mVfs)	



# 6. Oscilloscope numérique

Etat de l'art (2024)



	Keysight UXR1104B	Tektronix DPO77002SX	Lecroy LabMaster 10 Zi-A
Photo			
Bande passante (analogique)	110GHz	70GHz	100GHz
Fréquence d'échantillonnage	256GS/s	200GS/s	240GS/s
ADC	10 bits	8 bits	8 bits
Nombre de points / acquisition	2Gpts	1Gpts	1,5Gpts
Jitter horloge d'échantillonnage	20fs	<65fs	50fs
Type d'entrée	1mm 50Ω	1,85mm 50Ω	1mm 50Ω
ENOB	5 bits (@400mVfs)	4,6 bits (@250mVfs)	





# 6. Oscilloscope numérique

Etat de l'art (2024)

	Lecroy WaveMaster 8650HD	Lecroy LabMaster 10 Zi-A
Photo		
Bande passante (analogique)	65GHz	100GHz
Fréquence d'échantillonnage	320GS/s	240GS/s
ADC	12 bits	8 bits
Nombre de points / acquisition	16Gpts	1,5Gpts
Jitter horloge d'échantillonnage	15fs	50fs
Type d'entrée	1,85mm 50Ω	1mm 50Ω
ENOB	5,05 bits	

# 6. Oscilloscope numérique

## Acquisition et analyse spectrale

### Différents modes d'acquisition :

Normal

Moyenne

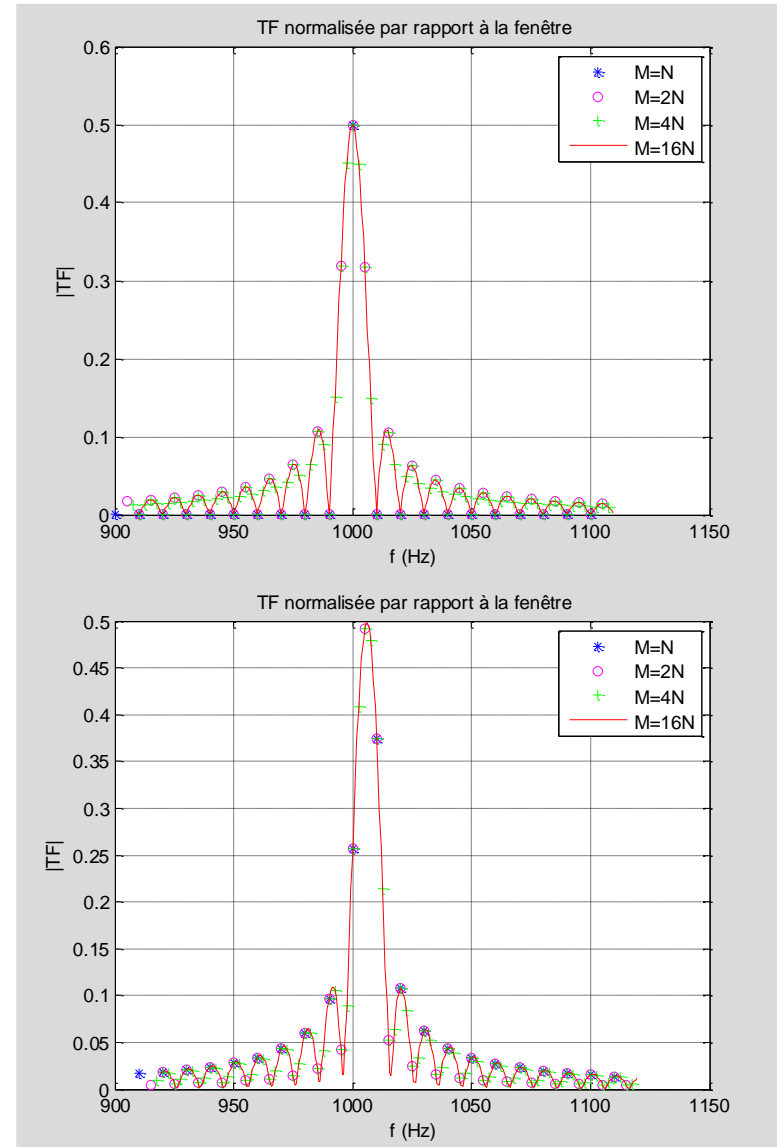
Haute résolution

### Analyse spectrale par FFT:

Grille d'analyse

Bourrage de zéros

Fenêtrage



# 6. Oscilloscope numérique

## Acquisition et analyse spectrale

### Différents modes d'acquisition :

Normal

Moyenne

Haute résolution

### Analyse spectrale par FFT:

Grille d'analyse

Bourrage de zéros

Fenêtrage

